



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

**JUKKA KUUSISTO**  
**TYÖKONESIMULAATTORI VIRTUAALIYMPÄRISTÖSSÄ:**  
**IMMERSIOTASO, LÄSNÄOLON TUNNE JA KÄYTTÄJÄN**  
**SUORIUTUMINEN**

Lisensiaatintutkimus

Tarkastajat: professori Asko Ellman ja  
FT, dosentti Tarja Tiainen  
Tarkastajat ja aihe hyväksytty  
automaatio-, kone- ja materiaalitekniikan  
tiedekuntaneuvoston  
kokouksessa 4.4.2012

# TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

**KUUSISTO, JUKKA: Työkonesimulaattori virtuaaliympäristössä: immersio-  
taso, läsnäolon tunne ja käyttäjän suoriutuminen**

Lisensiaatintutkimus, 60 sivua, 38 liitesivua

Kesäkuu 2012

Automaatio-, kone- ja materiaalitekniikan tiedekunta

Konstruktitekniikan laitos

Tarkastajat: professori Asko Ellman ja FT, dosentti Tarja Tiainen

Avainsanat: immersio, läsnäolo, virtuaaliympäristöt, työkonesimulaattorit

Tutkimuksessa selvitettiin kirjallisuuskatsauksen kautta, millä tavalla virtuaaliympäristöissä koettua läsnäolon tunnetta voidaan mitata. Lisäksi tutkittiin virtuaalitalaan rakennetulla kaivoskonesimulaattorilla suoritettujen käyttäjäkokeiden avulla, miten virtuaaliympäristön immersiotaso vaikuttaa koehenkilöiden kokemaan läsnäolon tunteeseen sekä suoritusten tasoon. Tutkimus on osa laajempaa kokonaisuutta, jossa kehitetään työkonesimulaattoria työkaluksi, jolla koneen käyttäjät pääsevät mukaan koneensuunnitteluprosessiin jo varhaisessa vaiheessa.

Yleisimmiksi menetelmiksi läsnäolon tunteen mittaamiseen havaittiin kyselylomakkeen avulla tehtävään itsearviointiin perustuvat menetelmät. Muut menetelmät perustuivat lähinnä joko jatkuvaan itsearviointiin, käyttäjän reaktioiden tarkkailuun tai fysiologisten reaktioiden mittaamiseen.

Käyttäjäkokeisiin osallistui 25 henkilöä. Tutkittavina immersiokomponentteina olivat kuvan kolmiulotteisuus, pään paikannus sekä liikealusta. Läsnäolon tunnetta mitattiin kyselylomakkeella. Koehenkilöiden suorituksista mitattiin kuormaaajan kauhahan nostettujen kivien määrä, lastauspaikalle kuljetettujen kivien määrä sekä kaivoskäytävän seiniin törmäysten lukumäärä.

Tulokset osoittivat, että liikealustan aktivoiminen lisää läsnäolon tunnetta, mutta kuvan kolmiulotteisuudella ja pään paikannuksella ei ollut vaikutusta. Kokeneet työkonekuljettajat raportoivat vähemmän läsnäolon tunnetta kuin muut. Liikealusta osoittautui ratkaisevan tärkeäksi simulaattorin realistisuudelle myös sitä kautta, että juuri liikealustan käyttö sai kokeneet kuljettajat suoriutumaan paremmin käyttäjäkokeissa.

## ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**KUUSISTO, JUKKA: Work machine simulator in a virtual environment: immersion level, sense of presence and user performance**

Licensiate Thesis, 60 pages, 38 Appendix pages

June 2012

Faculty of Automation, Mechanical and Materials Engineering

Department of Mechanical Engineering and Design

Examiners: professor Asko Ellman and Ph.D., docent Tarja Tiainen

Keywords: immersion, presence, virtual environments, work machine simulators

This research contained a review of methods used for measuring the sense of presence in virtual environments. In addition, user tests conducted with a mining machine simulator built in a virtual environment was used for investigating how the immersion level of the virtual environment affects the sense of presence experienced by the test users as well as their task performance. This research is a part of a larger process for developing a work machine simulator to be used as a tool with which machine operators can participate in the machine design process in an early phase.

It was found that the most common methods for measuring the sense of presence were questionnaire-based self-assessment methods. Other methods were mostly based on continuous self-assessment, observing the users' reactions, or measuring their physiological reactions.

A total of 25 persons took part in the user tests. The immersion components under study were stereoscopic imaging, head tracking, and a motion platform. A questionnaire was used for measuring presence. The following task performance metrics were investigated: the amount of rock lifted with the bucket, the amount of rock successfully transported to the unloading zone, and the number of times the machine collided with the walls of the mine corridor.

The results indicated, that activating the motion platform increases the sense of presence, whereas stereoscopy or head tracking had no significant effect. Experienced work machine drivers reported lower scores on the presence scale than other test users. The importance of the motion platform to the reality of the simulator was indicated also by the fact that the motion platform made the experienced drivers perform better in the user tests.

## ALKUSANAT

Tässä työssä esitetty tutkimus on suoritettu Tampereen teknillisen yliopiston konstruktitekniikan laitoksella. Työhön sisältyvät käyttäjäkokeet on tehty Tampereella, mutta tulosten analysointi ja kirjoitustyö on tapahtunut Seinäjoen toimipisteessä, joka on osa Seinäjoen yliopistokeskusta ja Epanet-verkostoa. Tutkimuksen tekeminen ei olisi ollut mahdollista ilman useiden henkilöiden työpanosta.

Ensinnäkin haluan kiittää ohjaajaani professori Asko Ellmania paitsi tämän työn ohjauksesta ennen kaikkea mahdollisuudesta olla mukana mielenkiintoisissa tutkimusprojekteissa aina vuodesta 2003 alkaen. Tutkimuksen toteuttamisessa virtuaalitekniikan tutkimusryhmäläiset ovat olleet korvaamaton apu. Haluan esittää kiitokseni paitsi teknisestä ja tieteellisestä tuesta myös erinomaisesta seurasta koko joukolle: Sampo Haapaniemi, Antti Itäsalo, Ville Jouppila, Taina Kaapu, Joonatan Kuosa, Ville Lepokorpi, Joonas Reunamo sekä Harri Saarinen. Suuret kiitokset myös työni toiselle tarkastajalle, FT Tarja Tiaiselle.

Erittäin miellyttävästä päivittäisestä kahvi- ja lounasseurasta tahdon kiittää koko Etelä-Pohjanmaan korkeakouluyhdistyksen sekä Seinäjoen yliopistokeskuksen väkeä.

Lopuksi haluan esittää erityiskiitokset vaimolleni Jennille, joka alun perin istutti päähäni ajatuksen lisensiaatintutkimuksen tekemisestä, sekä lapsilleni Auroralle, Aliisalle, Anniinalle ja Atsolle työrauhasta tutkimuksen kirjoittamiseen kotona, kun olin sairauslomalla katkenneen akillesjänteen vuoksi.

# SISÄLTÖ

Tiivistelmä . . . . .	II
Abstract . . . . .	III
Alkusanat . . . . .	IV
Sisältö . . . . .	V
Lyhenteet ja termit . . . . .	VII
1. Johdanto . . . . .	1
1.1 Virtuaaliympäristöjen ominaisuudet . . . . .	1
1.2 Työkonesimulaattorit . . . . .	6
1.3 Virtuaaliympäristöjen hyödyntäminen työkoneohjaamojen suunnitte-	
lussa . . . . .	9
1.4 Immersion ja läsnäolon käsitteet . . . . .	12
1.4.1 Immersio . . . . .	12
1.4.2 Läsnäolo . . . . .	13
2. Tutkimuksen tavoitteet . . . . .	20
3. Koetun läsnäolon tunteen mittaaminen . . . . .	21
3.1 Kyselylomakkeen käyttöön perustuvat menetelmät . . . . .	21
3.2 Jatkuva itsearviointi . . . . .	24
3.3 Käyttäjän reaktioiden tarkkailuun perustuvat menetelmät . . . . .	25
3.4 Fysiologisten reaktioiden mittaamiseen perustuvat menetelmät . . . . .	26
3.5 Muut menetelmät . . . . .	27
4. Immersiotason vaikutus kaivoskonesimulaattorissa . . . . .	28
4.1 Laitteisto ja järjestelmä . . . . .	28
4.2 Käyttäjäkokeet . . . . .	32
4.2.1 Testiryhmä . . . . .	33
4.2.2 Koejärjestely . . . . .	34
4.2.3 Tulokset . . . . .	38
5. Yhteenveto . . . . .	43
6. Tutkimukseen liittyvät julkaisut . . . . .	49
7. Johtopäätökset . . . . .	51
Lähteet . . . . .	53
Liitteet	
A. Immersive Tendencies Questionnaire . . . . .	61
B. Presence Questionnaire . . . . .	63
C. Julkaisu I: Effect of the immersion level of a virtual loader simulator on the	
sense of presence . . . . .	65
D. Julkaisu II: Developing VIP2M: a virtual environment for prototyping mobile	
work machines . . . . .	75

E. Julkaisu III: A co-creation tool in walk-in virtual environment: making prospective work visible . . . . .	86
--	----

## LYHENTEET JA TERMIT

AIP-kuutio	=	työkalu graafisten simulointijärjestelmien luokitteluun (engl. <i>Autonomy, Interaction, Presence</i> )
3D	=	kolmiulotteisuus, kolmiulotteinen
AR	=	lisätty todellisuus (engl. <i>Augmented Reality</i> )
AV	=	lisätty virtuaalisuus (engl. <i>Augmented Virtuality</i> )
CAD	=	tietokoneavusteinen suunnittelu (engl. <i>Computer-Aided Design</i> )
CAVE <sup>TM</sup>	=	virtuaaliympäristö, jossa kuva projisoidaan huoneen kokoisen kuution kolmelle tai useammalle tahkolle (engl. <i>Cave Automatic Virtual Environment</i> )
etäläsnäolo	=	jonkin laitteen etäkäyttäjän tunne siitä, että on samassa ympäristössä kuin laite
HMD	=	kypäränäyttö (engl. <i>Head-Mounted Display</i> )
immersio	=	uppoutuminen keinotodellisuuteen
ITC	=	järjestö, joka vastasi aikaisemmin kaupallisen televisiotoiminnan lisensoinnista ja säätelystä Isossa-Britanniassa (engl. <i>Independent Television Commission</i> )
ITQ	=	henkilön immersiiivisiä taipumuksia mittaava kyselylomake (engl. <i>Immersive Tendencies Questionnaire</i> )
kypäränäyttö	=	päässä pidettävä joko kypärän tai aurinkolasien kaltainen näyttö, jossa kuva muodostetaan aivan käyttäjän silmien eteen
lisätty todellisuus	=	ympäristö, jossa todellisen maailman esitykseen lisätään virtuaalikappaleita
lisätty virtuaalisuus	=	ympäristö, jossa virtuaalimaailmaan lisätään konkreettisia kappaleita
läsnäolo	=	tunne siitä, että on fyysisesti tai sosiaalisesti läsnä josakin ympäristössä
MR	=	tehostettu todellisuus (engl. <i>Mixed Reality</i> )
PQ	=	läsnäolon tunnetta mittaava kyselylomake (engl. <i>Presence Questionnaire</i> )
SOPi	=	eräs läsnäolon tunnetta mittaava kyselylomake (engl. <i>Sense of Presence Inventory</i> )
tehostettu todellisuus	=	ympäristö, jossa yhdistyvät virtuaalinen ja todellinen maailma
UCL	=	University College London, yliopisto Lontoossa

VR = virtuaalitodellisuus (engl. *Virtual Reality*)



# 1. JOHDANTO

## 1.1 Virtuaaliympäristöjen ominaisuudet

Virtuaaliseksi järjestelmäksi kutsutaan järjestelmää, joka on olemassa vain digitaalisessa muodossa mutta on ominaisuuksiltaan monin tavoin jäljittelemänsä järjestelmän kaltainen. Vastaavasti virtuaalinen ympäristö eli *virtuaaliympäristö* voidaan määritellä ympäristöksi, joka on olemassa vain digitaalisessa maailmassa mutta pystyy tuottamaan ympäristöä käyttävälle ihmiselle *ympäröivän* eli *immersiivisyyden* tunteen [32]. Työkalujen joukkoa, jolla virtuaaliympäristöjä luodaan, kutsutaan virtuaaliteknologiaksi, ja sen avulla muodostettua *virtuaalitodellisuutta* nimitetään myös *keinotodellisuudeksi*.

Keinotodellisuuden luomisessa oleellista on siis ihmisen aistien harhauttaminen niin, että keinoitekoisesti luotu aistipalaute koetaan ainakin jossain määrin totena. Virtuaaliympäristöjä voidaan luokitella monien ominaisuuksien perusteella [6], joita seuraavassa käydään lyhyesti läpi.

### Vuorovaikutuksen modaliteetit

Yleisimmät aistipalautekanavat virtuaaliympäristöissä ovat visuaalinen, äänellinen sekä haptinen palaute. Haptinen palaute pitää sisällään ihmisen tunto- ja tasapainoaistiin liittyvät tuntemukset kuten kosketuksen, värinän, asennon ja paineen sekä harvemmin keinotodellisuudessa palautteina käytetyt lämmön ja kylmyyden. Tyyppillisesti haptisen palautteen toteuttaminen jakautuu kahteen osaan: kosketus- ja voimapalautteeseen.

Virtuaalijärjestelmien sisääntuloina käytetään erilaisia ohjainlaitteita. Ne voivat olla yleiskäyttöisiä kuten 3D-hiiri tai sovelluskohtaisia kuten jonkin ajosimulaattorin hallintalaitteet. Mittaamalla käyttäjän paikkaa ja vartalon tai sen osien asentoja voidaan toteuttaa eleisiin perustuva ohjaus. Puhekäyttöliittymät ovat vielä melko harvinaisia ja erilaisten bio- ja aivoanturien käyttö ohjauksessa vielä harvinaisempaa.

### Avaruudellisuus

Virtuaalinen ympäristö voidaan esittää visuaalisesti joko kaksi- tai kolmiulotteisena. Kolmiulotteisuus voidaan toteuttaa kolmiulotteisella näytöllä kuten holografianäy-



Kuva 1.1: Lisätyn todellisuuden sovellus puhelimessa. Kuva: Wikitude.

töllä, mutta yleisempää on muodostaa kolmiulotteinen kuva käyttäjälle siten, että kummallekin silmälle esitetään kaksiulotteinen kuva omasta näkökulmastaan. Kolmiulotteinen vaikutelma katsojalle syntyy tällöin eri kuvien antaman informaation yhdistelmänä aivan kuten reaali maailmassakin tapahtuu.

### Fysikaalisen ja virtuaalisen todellisuuden suhde

Kun asteikon toisessa päässä on todellinen maailma ja toisessa täydellinen keinotodellisuus, väliin jäävät järjestelmät, joissa todellinen ja virtuaalinen ympäristö on yhdistetty jollakin tavoin. *Lisätyksi todellisuudeksi* (engl. *AR, Augmented Reality*) kutsutaan ympäristöä, jossa todelliseen maailmaan tuodaan virtuaalisia kappaleita. Vastaavasti *Lisätty virtuaalisuus* (engl. *AV, Augmented Virtuality*) tarkoittaa konkreettisten kappaleiden tuomista virtuaaliympäristöön. Käsite *tehostettu todellisuus* (engl. *MR, Mixed Reality*) pitää sisällään sekä lisätyn todellisuuden että lisätyn virtuaalisuuden. Lisätyn todellisuuden sovellukset ovat jo arkipäivää älypuhelimissa, joissa voidaan paikannustietojen avulla lisätä kamerakuvaan erilaista informaatiota (kuva 1.1). Lisättyä virtuaalisuutta edustaa esimerkiksi simulaattori, jossa on konkreettisia ohjainlaitteita (kuva 1.2<sup>1</sup>).

<sup>1</sup>Kuvat, joiden lähdettä ei ole erikseen mainittu, ovat TTY:n konstruktiotekniikan laitoksen virtuaalitekniikan tutkimusryhmän arkistosta.



Kuva 1.2: Lisätyn virtuaalisuuden sovellus: konkreettisilla ohjaimilla varustettu simulatori.

### **Yhteistoiminnan mahdollisuudet**

Virtuaaliympäristöjä voidaan jaotella sen perusteella, miten useamman käyttäjän samanaikainen osallistuminen niihin on mahdollista: Yhden käyttäjän ympäristöt on tyypillisesti toteutettu kypäränäytöllä, jolloin ainoastaan kypärää päässään pitävä henkilö näkee keinotodellisuuden. Projektionäytöllä sama kuva voidaan esittää usealle käyttäjälle samanaikaisesti. Tällöin yksi käyttäjä voi olla pääkäyttäjä, joka kontrolloi ympäristöä muiden toimiessa katsojina, tai järjestelmä voi mahdollistaa useamman samanarvoisen käyttäjän toiminnan. Mikäli pään paikannus on käytössä, näkevät kaikki kuvan paikannettavan henkilön näkökulmasta. Periaatteessa projektionäytöillä voitaisiin esittää kuvaa samaan aikaan useammankin henkilön näkökulmasta. Esimerkiksi toisen henkilön pään paikannuksen lisääminen järjestelmään edellyttäisi kuitenkin projektoreiden näyttötaajuuden kaksinkertaistamista. Vastavasti visualisointi vaatisi kaksinkertaisen määrän laskentaa. Tällaisia järjestelmiä ei vielä liene yleisesti käytössä.

### **Tilan ja ajan kuvaukset**

Sekä tilan että ajan kuvauksen suhteen on kolme mahdollisuutta: Ne voidaan kuvata yksi yhteen, jolloin virtuaalinen ja todellinen tila ovat samassa mittakaavassa

ja toiminta tapahtuu reaaliajassa. Toinen vaihtoehto on skaalaus, jolloin esimerkiksi kapeaa kuvakulmaa käytettäessä pään kääntäminen skaalataan siten, että kuvakulma muuttuu enemmän kuin pään asento. Kolmas vaihtoehto on vääristynyt suhde, joka tarkoittaa esimerkiksi suurennuslasin tyyppistä toimintoa, jolla käyttäjä voi paikallisesti suurentaa visuaalista näkymää tietystä kohdasta.

### **Sisällön tarkkuus**

Virtuaalisten kappaleiden ja virtuaaliympäristön esittämisen visuaalinen, äänellinen ja haptinen tarkkuus vaihtelee tietenkin hyvin paljon sovelluksen tarpeista riippuen. Käytettävissä olevat resurssit ja toisaalta järjestelmän käyttötarkoitus vaikuttavat siihen, minkä asteinen realismi on mahdollista ja tarpeellista saavuttaa.

### **Vuorovaikutteisuus**

Vuorovaikutteisuus tarkoittaa sitä, missä määrin virtuaaliympäristö reagoi käyttäjän tekemisiin ja miten paljon käyttäjä pystyy muuttamaan ympäristöä vaikuttamalla sen parametreihin ajon aikana. Asteikon toisessa päässä ovat eräajotyyppiset ratkaisut, joissa minkäänlainen vuorovaikutus ajon aikana ei ole mahdollista. Vastaavasti toisessa päässä on kattava reaaliaikainen pääsy kaikkiin malliparametreihin. On huomattava, että käytettävyyden kannalta on olennaista, miten erilaisia malliparametreja kontrolloidaan. Erilaiset syöteoperaatiot on organisoitava järkevästi siten, että suoraan ohjattavien vapausasteiden määrä pysyy kohtuullisena.

### **Autonomia**

Autonomia-asteikon toisessa päässä ovat passiiviset, geometriset tietorakenteet, joissa ei ole mitään toiminnallisuutta. Rakenteisiin voidaan kohdistaa transformaatiota, ja sitten ne voidaan renderöidä uudelleen. Toisessa päässä ovat virtuaaliset toimijat, jotka pystyvät ennakoivaan ja reaktiiviseen suunnitteluun sekä tietopohjaiseen toimintaan. Näiden ääripäiden välissä ovat esimerkiksi fysiikkaan perustuvat mallit, joihin on lisätty proseduureja, jotka vastaavat jäykkien ja taipuisien kappaleiden mekaanisista ominaisuuksista. Autonomia on siten mitta laskennallisen mallin kyvylle toimia ja reagoida simuloituihin tapahtumiin ja ärsykkeisiin.

### **Zeltzerin AIP-kuutio**

David Zeltzer esitteli vuonna 1992 graafisten simulointijärjestelmien luokittelujärjestelmän, joka perustuu kolmeen komponenttiin: autonomiaan, vuorovaikutukseen ja läsnäoloon [84]. Tätä *AIP-kuutiota* (engl. *Autonomy, Interaction, Presence*) voidaan käyttää virtuaaliympäristöjen sekä tavallisempien tietokoneanimaatio- ja graafisten simulointijärjestelmien kuvaamiseen, luokitteluun ja vertailuun. Sitä ei kuitenkaan

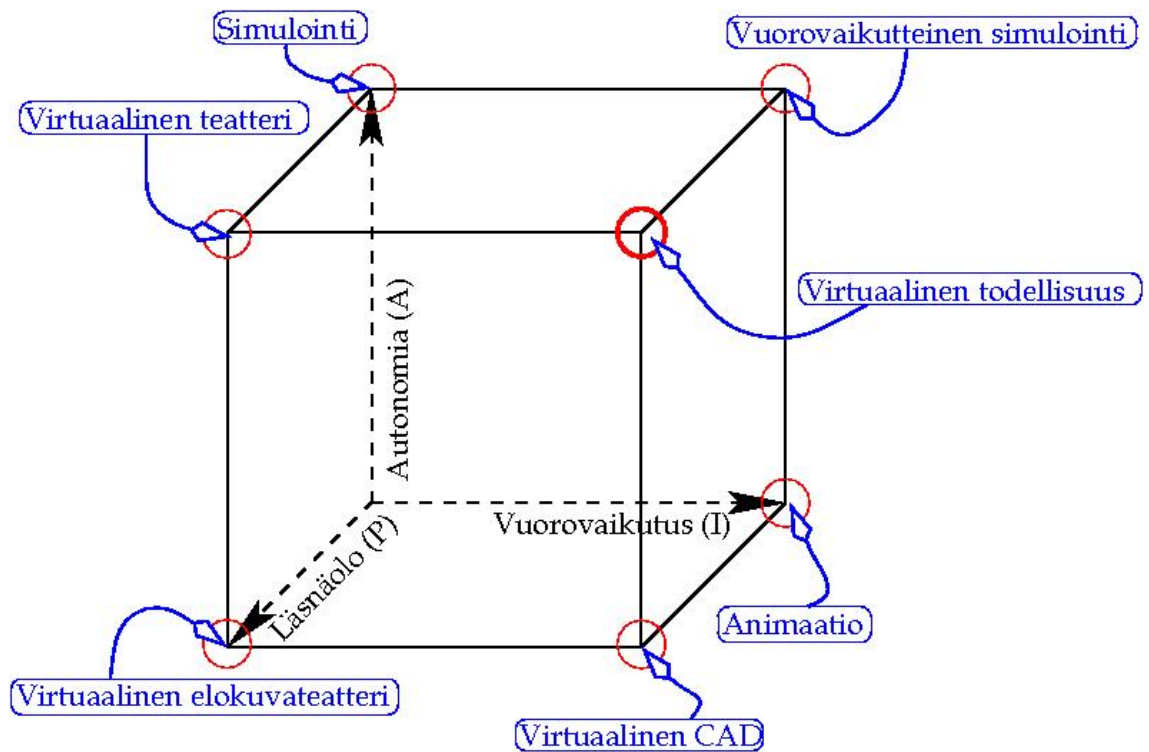
nykypäivänä juuri näe käytettävän johtuen ehkä AIP-komponenttien mittaamisen hankaluudesta.

Zeltzerin AIP-kuution kontekstissa läsnäolo on karkea mitta käytettävissä olevien aistisyöte- ja palautekanavien määrälle ja laadulle. Zeltzer korostaa läsnäolon tunteen suhteellisuutta: on aina määriteltävä, missä ja mitä tarkoitusta varten läsnäoloa mitataan. Koska ei ole mahdollista simuloida fyysisen maailman kaikkia yksityiskoh- tia, tiettyä tehtävää varten tulee tunnistaa ne aistivihjeet, joita tehtävän suorittami- seen vaaditaan, ja sitten pyrkiä toteuttamaan mahdollisimman tarkasti se ihmisen aistien ja motorisen suorituskyvyn taso, jonka tehtävä vaatii. Operationaalisten pa- rametrien määrittäminen vaatii sitten kompromisseja kustannusten, suorituskyvyn ja tehokkuuden välillä.

Kun vuorovaikutusakselilla mitataan interaktiokanavien määrää, liittyy läsnä- oloakseli siihen, millä ja kuinka luonnollisilla keinoilla näitä kanavia käytetään. On esimerkiksi luonnollisempaa manipuloida objektia suoraan kädellä kuin painamalla nappia tai kääntämällä nuppia. Siten läsnäoloakseli toimii mittana sille, missä mää- rin järjestelmän syöte- ja palautekanavat vastaavat ihmisen normaaleja interaktio- tapoja. AIP-kuution läsnäolon käsite poikkeaa merkittävästi siitä, mitä läsnäololla virtuaaliympäristöjen kontekstissa nykyään yleensä tarkoitetaan. Läsnäolon määri- telmiä käsitellään tarkemmin luvussa 1.4.2.

Edellä määritellyt kolme AIP-komponenttia toimivat akseleina koordinaatistos- sa, jota voidaan käyttää virtuaaliympäristöjen sekä tietokoneanimaatio- ja graafis- ten simulointijärjestelmien laadullisena mittana (kuva 1.3). Origoon kuuluvat tällöin järjestelmät, joissa ei ole minkäänlaista autonomiaa, vuorovaikutusta tai läsnäoloa. Kulmassa  $(1, 1, 1)$  puolestaan sijaitsee ”täyttymys”: täysin autonomiset toimijat ja objektit, jotka reagoivat simulaation tilaan ja käyttäjän toimintaan virtuaaliympä- ristössä, joka tuottaa käyttäjälle aistiärsyksiä, jotka vastaavat täydellisesti vuo- rovaikutusta todellisen maailman kanssa. Tällainen täydellinen järjestelmä on vielä nykypäivänä mahdollinen vain tieteiselokuvissa. Järjestelmiä suunniteltaessa on tie- tysti hyvä muistaa, että kaikissa tilanteissa maksimaalinen immersio ei ole tavoitel- tava asia, esimerkiksi etäkäytettäessä robottia johonkin raskaaseen tai vaaralliseen tehtävään.

Pisteessä  $(0, 1, 0)$  sijaitsisi kehittynyt animointijärjestelmä, jossa kaikkia mallien parametreja pystytään säätämään ajonaikaisesti. Nurkassa  $(0, 1, 1)$  tapahtuisi vuoro- vaikutteinen immersiivinen visualisointi, joka voisi olla vaikkapa CAD-mallin muok- kausta virtuaaliluolassa (CAVE, engl. *Cave Automatic Virtual Environment*) tai ky- päränäyttöä (HMD, engl. *Head-Mounted Display*) käyttäen. Kulmaan  $(0, 0, 1)$  puo- lestaan sijoittuisivat kehittyneillä aistipalauteteknologioilla voimakkaan läsnäolon tunteen luovat immersiiviset järjestelmät, joissa ei kuitenkaan ole vuorovaikutus- mahdollisuutta eikä autonomisia malleja. Piste  $(1, 0, 1)$  edustaisi korkeaa autonomi-



Kuva 1.3: Zeltzerin AIP-kuutio.

aa (esim. virtuaalisia näyttelijöitä ja fysikaalisia malleja) immersiiivisessä suuren läsnäolon ympäristössä ilman vuorovaikutusmahdollisuutta. Tämä voisi olla eräänlainen ”virtuaalinen teatteri”. Nurkassa  $(1, 0, 0)$  olisi fysikaalisia malleja ja virtuaalisia toimijoita käyttävä graafinen simulointi, jota katsellaan tavalliselta näytöltä ilman vuorovaikutusta. Pisteessä  $(1, 1, 0)$  sijaitsevat autonomiset mallit, joiden parametreihin on rajoitukseton pääsy, ja joita tarkastellaan tavalliselta näytöltä.

AIP-kuutio on siis käsitteellinen työkalu, jolla voidaan organisoida ymmärrystä tämänhetkisestä virtuaaliteknologiasta. Tällöin ”virtuaalitodellisuus” on saavuttamaton solmukohta, jossa kaikilla akseleilla oltaisiin maksimiarvossa. Ei kuitenkaan ole selvää tai yksiselitteistä, miten eri akselien arvot määritellään. Kyse on siis aina suhteellisista arvoista, joilla eri järjestelmiä voidaan verrata.

## 1.2 Työkonesimulaattorit

Virtuaaliympäristöjä hyödyntäviä työkonesimulaattoreita käytetään yleisesti ottaen kolmeen eri tarkoitukseen: markkinointiin, koulutukseen ja tuotekehitykseen. Kalliin työkoneen markkinoinnissa simulaattori, jolla potentiaalinen asiakas pääsee kokeilemaan koneen toimintaa ennen hankintapäätöstä, on myyjälle arvokas työkalu. Myöskään kehittyneen simulaattorin mukanaan tuomaa brändipääomaa ei sovi vähätellä. Suurimmilla työkonevalmistajilla onkin esimerkiksi alan messuilla usein jonkinlai-

nen simulaattori näytteillä. Erilaisten räätälöityjen ratkaisujen toteuttamisen tueksi asiakkaalle voidaan demonstroida eri ratkaisujen vaikutusta koneen ulkoasuun ja toimintaan.

Koulutussimulaattoreiden käyttö on monella tapaa kannattavaa oikealla koneella tapahtuvaan koulutukseen verrattuna:

- Simulaattorikoulutus säästää resursseja. Oikeat koneet voidaan pitää käytössä siellä, missä niitä tarvitaan. Koulutettavia ei tarvitse kuljettaa esimerkiksi kaivokseen koulutusta varten. Simulaattorikoulutus ei kuluta konetta eikä polttoainetta. Työkonetta ajettaessa konetunnit ovat kalliita ja mukana on aina riski koneen rikkoutumisesta.
- Simulaattorilla tapahtuva koulutus on tehokasta. Tiettyä ajotehtävää voidaan toistaa tarvittaessa niin kauan, että se on opittu. Ajo-olosuhteita ja suoritettavaa tehtävää voidaan säätää tarpeen mukaan. Mikäli käytössä on monen käyttäjän virtuaaliympäristö, voi useampi henkilö tarkkailla suoritusta samanaikaisesti ja nähdä saman, minkä kuljettajakin näkee. Suoritukset voidaan tallentaa, ja niitä voidaan analysoida jälkeenpäin. Harjoitukset ovat toistettavissa täsmälleen samanlaisina myöhemmin uudelleen.
- Simulaattorikoulutus on turvallista. Simulaattorilla voidaan simuloida erilaisia vaaratilanteita, ja niiden hallittu harjoittelu on helposti toteutettavissa. Simulaattorin ohjaimiin tarttumiseen on todennäköisesti pienempi kynnys kuin oikean koneen.

Toisaalta koulutussimulaattoreiden käyttöön liittyy myös joitakin ongelmia:

- Simulaattorin toteuttaminen vaatii resursseja. Se pitäisi nähdä investointina, jonka hyöty realisoituu myöhemmin resurssien säästöinä.
- Simulaattori ja virtuaaliympäristö eivät vastaa oikeaa konetta ja aitoa ympäristöä täydellisesti. Tämä saattaa vaikuttaa koulutettavan asenteeseen ja toimintaan, kun hän tietää ajavansa ”vain” simulaattorilla. Vastaavasti käyttäjän saama tuntuma koneesta ja sillä suoritettavasta tehtävästä ei ole täysin realistinen.

Näiden haasteiden ratkaisemiseksi on oleellista tutkia, mitkä asiat simulaattorin toteuttamisessa ovat olennaisimpia simulaattorin toiminnan ja realistisuuden kannalta ja miten käyttäjän kokemus virtuaaliympäristössä toimimisesta rakentuu.

Yksi keskeisistä kysymyksistä koulutussimulaattorin rakentamisessa on, halutaanko virtuaalinen näkymä esittää samaan aikaan useammalle henkilölle, esimerkiksi kouluttajalle ja koulutettavalle. Kouluttaja saa tietysti informaatiota koulutusajon

sujumisesta, jos näkee saman näkymän kuin ajaja. Tällöin virtuaalimaailma on luotava projektionäyttöillä, jotka toisaalta vievät tilaa. Projektionäyttöjen käyttö koulutussimulaattoreissa on yleistä, ja Suomestakin löytyy kaupallisia toimittajia tälle teknologialle.

Kompaktimpi simulaattori saadaan, jos visualisointi tapahtuu kypäränäytön avulla. Esimerkiksi Segura ja muut [58] kehittivät rakennustyökoneiden turvallisen käytön koulutukseen simulaattorin, jossa oikea ohjaamo sijoitettiin liikealustan päälle. Visualisointi tapahtui läpikatseltavan kypäränäytön avulla, jolloin käyttäjä pystyi samaan aikaan näkemään ohjaamon rakenteet, hallintalaitteet, kolmiulotteisen virtuaaliympäristön sekä vielä viestejä, joita kypäränäytölle voitiin lähettää. Keinotodellisuus esitettiin väriavainnusmenetelmää käyttäen. Ohjaamon ikkunat päällystettiin sinisellä kalvolla ja kypäränäytöllä siniset alueet korvattiin virtuaalisella näkymällä. Käyttäjän pään paikannukseen käytettiin optista paikannusta kypäränäytön kiinnitetyn aktiivisen infrapunamarkkerin avulla. Magneettisen paikannuksen havaittiin olevan liian epätarkkaa ohjaamon metallisen rakenteen aiheuttamisen häiriöiden vuoksi. Kokeissa tulivat esiin kypäränäytön huonot puolet: niskan ja pään rasittuminen sekä kuumuus. Väriavainnusmenetelmä toimi hyvin ja kolmiulotteista näkymää pidettiin vakuuttavana. Sen sijaan virtuaalinäkymän päälle asetetut viestit olivat osin hämmentäviä johtuen siitä, että ne renderöitiin parallaksin nollatasolle. Optinen paikannus aiheutti eniten häiriötä, johtuen ilmeisesti siitä, että käytettiin vain yhden kameran järjestelmää.

Tuotekehityssimulaattoreiden avulla voidaan tutkia erilaisten suunnitteluratkaisujen vaikutuksia lopulliseen tuotteeseen jo konseptisuunnitteluvaiheessa. Virtuaalisten prototyyppien avulla säästetään aikaa ja rahaa, kun ei tarvitse valmistaa fyysisiä prototyyppieitä. Virtuaalimalli mahdollistaa työkonen tarkastelemisen käyttäjän näkökulmasta luonnollisen kokoisena ja kolmiulotteisena. Muutosten tekeminen virtuaaliprototyyppiin on nopeaa. Yrityksen eri osastot suunnittelusta ja kehityksestä myyntiin ja markkinointiin pääsevät näin keskustelemaan erilaisten ratkaisujen toteuttamisesta ilman, että tarvitsee odottaa fyysisen prototyypin rakentamista. Nopeasta prototypoinnista ja testauksesta on erityisen paljon hyötyä ajan säästämisen muodossa, kun käytetään iteratiivista suunnittelua.

Erilaisten toiminnallisuuden toteuttamisen vaikutusta työkonen käyttöön voidaan tutkia simulaattorilla, jossa on realistinen dynaaminen simulointimalli koneesta. Esimerkiksi Fales ja muut [16] tutkivat kuormaajan kauhan asentoon vaikuttavan ohjausalgoritmin tehoa virtuaalisimulaattorilla. Käyttäjäkokeet osoittivat, että ohjausalgoritmin avulla kokematon käyttäjä sai merkittävästi paremmin pidettyä kauhan suorassa nostettaessa. Ohjausalgoritmin toteuttaminen oikean koneen ohjausjärjestelmään tuli näin perustelluksi.



### 1.3 Virtuaaliympäristöjen hyödyntäminen työkoneohjaamojen suunnittelussa

Virtuaalitekniikan avulla voidaan tarkastella suunniteltua työkoneohjaamoa ilman fyysisten prototyyppien rakentamista. Tällöin säästetään huomattavasti aikaa ja kustannuksia, kun jokaisen CAD-mallin muutoksen toteuttamiseksi ei tarvitse rakentaa ohjaamoa uudelleen. Erityisesti ergonomian ja näkyvyyden arvioinnissa muutoksia voidaan tehdä nopeaan tahtiin. Immersiivistä keinotodellisuutta hyödyntävät virtuaaliprototyypit voivat korvata fyysikaaliset koemallit, kun analysoidaan suunnittelun yksityiskohtia kuten osien sijoittelun ja koteloinnin tehokkuutta, hallintalaitteiden ja peilien näkyvyyttä, ulottuvuuksia, liikkumisvaroja ja törmäyksiä, ihmisen toimintaa sekä estetiikkaa ja vetovoimaa [21].

Koska työkoneilla tehdään usein pitkiä työvuoroja, ergonomiset näkökohdat ohjaamon suunnittelussa ovat tärkeitä. Tuki- ja liikuntaelinsairauksien vähentämiseksi pitäisi minimoida kuljettajaan kohdistuva värinä, sijoittaa hallintalaitteet siten, että niiden käyttäminen vaatisi mahdollisimman vähän kurkottamista sekä vartalon venyttämistä ja kääntöä, sekä maksimoida näkyvyys normaalista istuma-asennosta ilman vartalon tai niskan venyttämistä [85]. Saksassa vuonna 2003 tehdyssä kyselytutkimuksessa 273:sta työkoneen kuljettajasta lähes puolet piti ohjaamon mukavuutta keskimääräisenä tai huonona [33]. Kun laitteiston sijoittelua suunnitellaan ja testataan virtuaalimallien avulla, voidaan löydettyjä optimaalisia ratkaisuja hyödyntää myös eri konemalleissa. Onnettomuusriskin vähentämiseksi olisi tärkeää, että hallintalaitteiden sijoittelu ja toiminnan logiikka olisi mahdollisimman samanlainen eri konemalleissa, joita kuljettaja työssään joutuu käyttämään [59].

Mattilan mukaan [42] järjestelmän turvallisuutta ja ergonomista laatua voidaan kuvata prosessina, jossa turvallisuuteen ja ergonomiaan liittyvät vaatimukset muodostavat yhden komponentin määrittelyistä, jotka tulee toteuttaa järjestelmän suunnittelun ja rakentamisen aikana. Suunnitteluvaiheen aikana suoritettava riskianalyysi on toinen turvallisuuteen liittyvän informaation komponentti, joka pitää huomioida suunnittelun eri vaiheissa. Toteutusten seurauksista pitäisi kerätä palautetta sieltä, missä on kokemusta samanlaisten järjestelmien käytöstä. Virtuaalimallien avulla voidaan sekä tehdä riskianalyysijä että kerätä kokemuksia eri toteutuksista ilman, että tarvitsee rakentaa konkreettisia prototyyppejä.

Virtuaaliympäristöön rakennettuja työkonemalleja voidaan hyödyntää erilaisissa näkyvyydestarkasteluissa. Koneen ohjaamon sijainnin ja ominaisuuksien vaikutuksia näkyvyyteen koneen kuljettajan kannalta on mahdollista tutkia virtuaaliympäristössä, jossa käyttäjän pään paikka on paikannettu. Tällöin näkymä ohjaamosta on realistinen ja voidaan tarkastella eri työvaiheiden aikana näkyvyyteen vaikuttavien asioiden kuten pilarien, puomien, kauhan, vaijerien, letkujen ja ohjainlaitteiden

sijoittelun vaikutuksia ja hakea optimaalisia ratkaisuja.

Erilaisten näyttöjen ja merkkivalojen sijoittelun kannalta oleellista on, mikä on kuljettajan näkökenttä työskentelyn aikana. Huonosta näkökentästä aiheutuu monenlaisia haittoja [4]: Ensinnäkään koneen toiminnallisuuksia ei pystytä täysimääräisinä hyödyntämään. Hankalat työasennot, joita kuljettaja saattaa joutua käyttämään näkökenttensä parantamiseksi, voivat aiheuttaa terveysongelmia. Myös ympäristö ja siellä olevat muut henkilöt voivat olla vaarassa näköesteiden vuoksi. Koneen rakenteen aiheuttamien katvealueiden ja ympäristöstä johtuvien näköesteiden lisäksi myös joko liiallinen valaistus (häikäisy) sekä riittämätön valaistus aiheuttavat onnettomuuksia työkoneita käytettäessä [23].

Käyttöliittymäelementtien optimaalisen sijoittelun haasteellisuutta lisää, että näkökenttään vaikuttavat visuaaliset taustaolosuhteet sekä kohteen koko. Lisäksi on esitetty, että varoitusnäyttöjen tulisi sijaita 30 asteen sisällä ”normaalista” näköakselista [30]. Tietyissä työkoneissa kuten sivuttain ajettavissa kuormaaajissa kuljettajan katseen suunta työn aikana vaihtelee 180 astetta. Virtuaaliprototyyppien avulla voidaan tarkastella kuljettajan näkökenttää ja näyttöjen sijoittelun vaikutusta oleellisen informaation välittymiseen kuljettajalle.

Alustavaa tietoa näkyvyydestä voidaan hankkia jopa täysin laskennallisesti käyttäen virtuaalimallia myös kuljettajasta ja määrittämällä näköalueet virtuaalihakmon pään paikan perusteella [10]. Godwinin ja muiden tutkimuksessa [20] suoritettiin kaivoskuormaaajan näkökenttäanalyysiä siten, että virtuaalinen ihmishahmo simuloitiin kuormaaajan ohjaamoon Classic JACK -ohjelmistolla. Alustavan analyysin perusteella kuormaaajien piirustuksia muokattiin näkökentän parantamiseksi, ja menetelmän toimivuus varmistettiin toistamalla analyysi. Näkyvyyden lisäksi myös laitteiston sijoittelua ja ergonomiaa voidaan tutkia virtuaalista ihmismallia käyttäen, kuten Lijingin ja muiden tutkimuksessa tehtiin lentokoneohjaamoa koskien [37].

Suurissa työkoneissa, joiden ohjaamo on pieni, näkyvyys etenkin koneen lähialueilla jää väistämättä puutteelliseksi, vaikka ohjaamon sisäisiä rakenteita pyrittiin siinkin optimoimaan. Koneen runkoon sijoitetuilla kameroilla ja niiden kuvaa ohjaamon sisällä esittävillä lisänäytöillä tätä ongelmaa on mahdollista korjata. Godwin ja Eger tutkivat kaivoskuormaaajan näkyvyyden parantamista kameroiden avulla [19]. Pelkästään virtuaalimalliin perustuvassa tutkimuksessa todettiin, että pelkillä koneen rakenteen muutoksilla (lokasuojien madaltaminen, koneen takaosan madaltaminen upottamalla sylinterit koneen runkoon sekä lisäaukkojen leikkaaminen ohjaamoon) saatiin hieman parannusta näkyvyyteen. Kokeessa testattiin kolmea ulkopuolisen kameran paikkaa: ohjaamoa, etuosaa ja takaosaa. Tulokset osoittivat, että kameroita käyttämällä näkyvyys parantuu huomattavasti. Toinen kysymys on, miten kameroiden kuvaa esittävät näytöt kannattaa sijoittaa ohjaamossa ergonomian

ja käytettävyyden kannalta. Tämän asian tutkiminen vaatii joka tapauksessa kokeita, joissa ihminen on fyysisesti läsnä.

Käytettävyyden ja ergonomian kannalta tuotekehityssimulaattoreita voidaan käyttää erityisesti hallintalaitteiden sijoittelun osalta. Virtuaalimallissa on helppo vaihtaa hallintalaitteiden paikkoja ja esimerkiksi säätää paneelien ja näyttöjen kokoja ja muotoja. Tuomalla loppukäyttäjät eli koneen kuljettajat testaamaan simulaattoria saadaan käsitys siitä, miten todelliset työprosessit koneen ohjaimilla tapahtuvat. Käyttäjän kokeman rasituksen lisäksi näin saadaan varmistettua, että konetta ja sen hallintalaitteita käytetään oikein. Työolosuhteita kuten valaistusta voidaan säätää ja hakea siten tietoa koneen käytettävyydestä ääriolosuhteissa. Tällä tavoin loppukäyttäjät pääsevät osalliseksi tuotekehitysprosessiin jo aikaisessa vaiheessa. Päätöksenteon tueksi saadaan kokemuksen tuomaa tietämystä, ja mahdolliset suunnitteluvirheet huomataan aikaisemmin.

Jotta virtuaaliympäristöön toteutetusta simulaattorista saataisiin mahdollisimman paljon hyötyä aidon koneen käytettävyyteen liittyvien seikkojen tutkimuksessa, on käyttäjän ja virtuaaliprototyypin välisen vuorovaikutuksen taso ratkaisevan tärkeä. Oikean koneen käyttöliittymä pitäisi saada jäljiteltävä mahdollisimman realistisesti simulaattoriin ja käyttäjän toiminnan tulisi olla luonnollista. Vuorovaikutus voidaan toteuttaa yleisesti ottaen kahdella tavalla [8]: aitoja työkoneen ohjauslaitteita käyttäen tai kokonaan virtuaalisesti. Mikäli aidot ohjaimet ovat käytössä, käyttäjä lähettää ohjauskäskyt niiden välityksellä suoraan simulaatioympäristölle, joka prosessoi käyttäjän toimintaa ja laskee virtuaaliprototyypin toiminnan matemaattisen simulointimallin mukaisesti. Simuloinnin tulokset välitetään visualisointiympäristölle, joka päivittää virtuaalimallit. Mikäli käyttöliittymä on virtuaalinen, käytetään ohjaamiseen erityisiä virtuaalitekniikan laitteita kuten datahanskoja ja haptisia laitteita. Tällöin käyttäjän suorittamat toiminnot täytyy ensin tunnistaa koneen ohjauskäskyiksi, jotka sitten välitetään simulaatiosovellukselle. Tietenkin on mahdollista myös toteuttaa osa käyttöliittymästä aidoilla ohjauslaitteilla ja osa virtuaalisilla elementeillä.

Esimerkki haptiikan käytöstä virtuaaliprototyyppien yhteydessä on Salaminin ja muiden kuorma-autosimulaattori [53], jossa vaihdekeppi on toteutettu haptisena elementtinä Immersionin Haptic Workstation -haptiikkajärjestelmää käyttäen. Visualisointi simulaattorissa tapahtuu kypäränäytöllä. Käyttäjäkokeissa mitattiin hauis- ja hartialihaksen sähkötoimintaa EMG-tutkimuksella ja saatuja arvoja verrattiin oikean ajoneuvon (joka tosin oli henkilöauto eikä kuorma-auto) ajamisen aikana mitattuihin arvoihin. Tuloksena todettiin, että simulaattorin vaatimat voimat vaihteiden vaihtamisessa vastasivat tyydyttävästi oikean vaihdelaatikon käyttöä. Tavoitteena oli käyttää sovellusta simulaattorilla tapahtuvassa ajoharjoittelussa.

## 1.4 Immersion ja läsnäolon käsitteet

Immersion ja läsnäolo ovat virtuaaliympäristöihin liittyviä peruskäsitteitä. Lyhyesti sanottuna immersion kuvaus sitä, missä määrin virtuaaliympäristö tarjoaa ihmisen aisteille herätteitä, jotka saavat hänet uppoutumaan keinotodellisuuteen. Läsnäolon tunne puolestaan on jonkinlainen mitta sille, kuinka ihminen kokee todella olevansa virtuaalimaailmassa todellisen maailman sijasta. Seuraavissa kappaleissa tarkastellaan lähemmin näiden käsitteiden määritelmiä ja merkitystä.

### 1.4.1 Immersion

Immersion käsitteelle on kaksi periaatteellisesti erilaista määritelmää, joita voidaan kutsua Witmerin & Singerin sekä Slaterin määritelmiksi. Yleisesti ottaen immersion merkitystä käsitteleviä tutkimustuloksia lukiessa on kiinnitettävä huomiota siihen, miten immersion on kyseisessä tutkimuksessa määritelty.

#### Immersion ympäristön ominaisuutena

Slaterin [66] mukaan immersion on jotakin, jonka teknologia tuottaa objektiivisesta näkökulmasta. Mitä enemmän järjestelmässä on eri aistipalauttekanavia ja paikannusta, joka saa virtuaalisen aistipalautteen vastaamaan todellisia aisteja, sitä immerssiivisempi järjestelmä on. Tällöin immersion on objektiivisesti mitattavissa esimerkiksi suoraan immersiokomponenttien lukumääränä tai niiden laadullisten parametrien kautta. Se, miten ihminen kokee immerssiivisen palautteen, on eri asia. Immerssioon vaikuttavia komponentteja ovat muun muassa:

- näkö-, kuulo-, tunto- ja hajupalautteen tarkkuuteen vaikuttavat parametrit kuten näkökulman ja näkökentän koko, näytön koko ja resoluutio, stereoskopia, panoraamanäkymä, näytön kuvataajuus ja virkistystaajuus, renderointi pään paikannuksen perusteella, valaistuksen ja äänimaailman realismi, tilaääni ja haptiikan eli voima- ja tuntopalautteen resoluutio ja realismi,
- simuloitavan objektin toiminnallinen tarkkuus (esim. käyttäytykö, puhuuko ja liikkuuko virtuaalinen ihminen kuten oikea?),
- näytön viive ja järjestelmän latenssi,
- paikannuksen kattavuus sekä
- lämpötila, ilmavirrat, painovoima ja aistien eristäminen ympäröivästä ulkopuolisesta maailmasta.

## Immersio ihmisen kokemana tilana

Yleisesti käytetty on myös Witmerin ja Singerin [82] määritelmä immersioista: Immersio on tila, jossa ihminen kokee olevansa jossakin tilassa, samalla tilan ympäröimänä sekä vuorovaikutuksessa tilan kanssa siten, että tila tuottaa jatkuvaa herätettä aisteille. Virtuaaliympäristö, joka tuottaa suuremman immersion tunteen, tuottaa myös voimakkaamman läsnäolon kokemuksen. Immersioon vaikuttavia tekijöitä ovat erillisyys fyysisestä ympäristöstä, havainto virtuaaliympäristön sisällä olemisesta, luonnolliset vuorovaikutus- ja kontrollimenetelmät ja havainto liikkeestä. Vaikka virtuaaliympäristön laitteisto on ratkaisevassa roolissa immersion mahdollistamisessa, immersio ei ole virtuaaliteknologian objektiivinen kuvaus, toisin kuin Slaterilla.

Tämän määritelmän mukaisesti voidaan puhua yksilön immersiiivisistä taipumuksista eli yksilöllisistä eroista ihmisten taipumuksista kokea immersiota eri ympäristöissä. Immersio on tällöin yksi välttämättömistä ehdoista läsnäolon tunteen kokemiselle. Tekijöitä, jotka vaikuttavat immersiivisiin taipumuksiin ovat mm. keskittymiskyky, kokemus interaktiivisista peleistä ja taipumus matkapahoinvointiin. Immersiiivisiä taipumuksia mitataan usein Witmerin ja Singerin ITQ-lomakkeella (engl. *Immersive Tendencies Questionnaire*, liite A).

Samaan kategoriaan kuuluu tulkinta, jonka mukaan immersio on yksi fyysisen läsnäolon komponenteista [74]. Tämän näkemyksen mukaan läsnäolon tunteella on kolme pääkomponenttia: 1) virtuaaliympäristön realistisuus, 2) virtuaaliympäristön kyky luoda käyttäjälle tietoisuutta paikan suhteen ja 3) käyttäjän psykologinen immersio eli huomion keskittäminen virtuaaliympäristöön todellisen maailman sijasta.

### 1.4.2 Läsnäolo

Läsnäolon tunteen (englanninkielinen termi *presence*) käsite on yleensä esillä lähes jokaisessa tutkimuksessa, joka koskee käyttäjän vuorovaikutusta virtuaalitodellisuuden kanssa. Kattavat katsaukset käsitteen merkityksen kehityksestä ovat tehneet Coelho ja muut [11] sekä Lee [35].

Oleellista on tietenkin läsnäolon ja immersion käsitteiden erottaminen toisistaan. Slater [66] esittää vertauksena väreihin, että immersio vastaisi aallonpituuksien jakaumaa ja läsnäolo värihavaintoa. Läsnäolo on tällöin ihmisen reaktio immersioon. Sama järjestelmä voi tällöin tuottaa eri ihmisille eri läsnäolokokemuksen ja toisaalta eri immersiotason järjestelmät voivat eri ihmisille antaa saman läsnäolon tunteen. On myös huomattava, että läsnäolon tunne ei välttämättä liity mitenkään siihen, onko virtuaalinen ympäristö käyttäjän mielestä kiinnostava tai mukaansatempaava. Esimerkiksi immersiivinen ääniympäristö saattaa luoda kuuntelijalle tunteen, että hän on oikeassa konsertissa (eli kokee voimakkaan läsnäolon tunteen), mutta jos soitettava musiikki ei ole kiinnostavaa, kuulijan mielenkiinto loppahtaa nopeasti.

## Termin alkuperä

Aluksi käytettiin termiä etäläsnäolo (englanninkielinen termi *telepresence*, jonka kehitti Marvin Minsky vuonna 1980 [44]). Etäläsnäolo tarkoittaa sitä, että käytettäessä jotakin laitetta etäkäyttöliittymän kautta (*teleoperointi*) käyttäjä tuntee itse olevansa ympäristössä, jossa laite toimii. Tällöin käyttäjän on luonnollisesti saatava käyttökohteesta rittävää aistipalautetta (ääni, kuva, mahdollisesti haptiikka), jotta virtuaalinen kokemus ylittää reaalimaailmassa olemisen tunteen. Läsnäolosta (*presence*) virtuaaliympäristössä alettiin puhua vuonna 1992, kun Sheridan ja Furness käyttivät sitä uuden lehden otsikossa: *Presence, Teleoperators and Virtual Environments*. Ensimmäisessä numerossa Sheridan viittaa virtuaaliympäristön luomaan läsnäolon tunteeseen *virtuaalisena läsnäolona* (*virtual presence*) ja jättää termin etäläsnäolo koskemaan vain teleoperointia [60].

## Termin merkityksen määrittäminen

Vuonna 1999 perustetussa elektronisessa foorumissa *Presence-L Listserv* käytiin vuonna 2000 keskustelu läsnäolosta [11]. Tuloksena syntyi seuraavanlainen ehdotus määritelmäksi:

Läsnäolo on psykologinen tila tai subjektiivinen havainto, jossa osallistujia ei ymmärrä teknologian roolia kokemuksessaan, vaikka käyttäkin jotakin laitetta. Vaikka henkilö saattaisikin pitää totena (paitsi äärimmäisissä tapauksissa), että käyttää jotakin teknologiaa, hän uppoutuu tehtävänsä, objektien, kokonaisuuksien ja tapahtumien havainnoimisen pauloihin ikään kuin teknologia ei olisi läsnä.

Tuokin on tietenkin vain yksi määritelmä eikä sillä ole virallista asemaa. Lisäksi se on melko pitkä ja hieman hankalasti hahmotettava. Joka tapauksessa läsnäoloon liittyvät sitoutuminen tunnetasolla ja kokemuksen realistisuuden taso [40]. Mitä tahaan virtuaalitodellisuutta luovaa järjestelmää voidaan tarkastella kahdelta kannalta: teknologisenä komponenttina ja psykologisenä kokemuksena. Vastaavasti läsnäolon tunteen määritelmät ja selitykset voidaan jakaa toisaalta rationalistiseen ja toisaalta psykologiseen näkökulmaan [11].

Rationalistisesta näkökulmasta virtuaalitodellisuusjärjestelmä on kokoelma erityisiä laitteita, jotka välttämättä sisällyttävät järjestelmään mielteiden läsnäolon tunteesta. Tällöin läsnäolon tunne kuvataan tietyn ilmaisuvälineen kokemisen funktiona (*medialähtöinen läsnäolon tunne*). Tämän tuloksena läsnäolo voidaan määritellä *havaintoihin perustuvana ilhuusiona siitä, ettei mitään ilmaisuvälinettä ole käytössä* [39]. Tämän illuusion tuottaa se, että käytetty ilmaisuväline katoaa käyttäjän tietoisuuden huomion alaisuudesta. Sinänsä tässä teknologisessa määritelmässä ei kiistettä

psykologisen puolen olemassaoloa VR-järjestelmissä, sitä vain ei sisällytetä määritelmään. Läsnaolon käsite voidaan tällöin jakaa kahteen karkeaan kategoriaan: fyysiseen ja sosiaaliseen. Fyysinen läsnäolo tarkoittaa henkilön tunnetta siitä, että on fyysisesti läsnä jossakin ympäristössä. Sosiaalinen läsnäolo puolestaan tarkoittaa tunnetta siitä, että on yhdessä (ja kommunikoi) jonkun kanssa.

Toisessa ääripäässä on psykologinen näkökulma (*sisäinen läsnäolon tunne*). Siinä läsnäolo nähdään kokemuksena, joka liittyy moniin erilaisiin ihmisen kokemuksiin ja on riippumaton teknologiasta. Läsnaoloa pidetään tällöin neuropsykologisena ilmiönä, joka on kehittynyt biologisen ja kulttuurisen perimämme yhteisvaikutuksesta ja jonka tarkoituksena on ohjata ihmisen toimintaa [51, 52].

### **Medialähtöinen läsnäolon tunne virtuaalitodellisuudessa**

Rationalistisesta näkökulmasta VR määritellään kokoelmana teknologisia laitteita (tietokoneita, kypäriä, hanskoja...), joihin yleensä liittyy jokin kommunikointikeino. Nykyisten aistipalautejärjestelmien avulla käyttäjä voi astua kolmiulotteiseen maailmaan, jossa voi katsella, kuunnella ja koskettaa asioita sekä liikkua ja tutkia ympäristöä. Käyttäjä uppoutuu virtuaalimaailmaan ja hän kokee samanlaisen ego-sentrisen paikan tunteen kuin todellisessa maailmassakin. Näiden vaikutelmien monipuolisuus ja laatu määrittävät ympäristön immersiotason, joka synnyttää läsnäolon tunteen. Monien tutkijoiden mielestä immersio on täysin teknologista ja läsnäolon tunne riippuu siitä, missä määrin käyttäjä on järjestelmän ”sisällä” eli irrallaan todellisesta ympäristöstä. Mitä suurempi on aistillinen immersio, sitä voimakkaampi on tunne siitä, ettei keinotekoisia ilmaisuvälineitä ole käytössä, mistä syntyy kokemus ”siellä olemisesta”. Aistien ”harhauttaminen” on siis VR-teknologian perusteltava. Aistillinen stimulaatio ja tietokoneella luotuun maailmaan osallistuminen ovat päätekijöitä, jotka saavat tällaisessa järjestelmässä uppoutuneena olevan käyttäjän kokemaan sitä, mitä kutsutaan läsnäoloksi. [11]

### **Sisäinen läsnäolon tunne virtuaalitodellisuudessa**

Steuerin mukaan läsnäolo on niin tärkeä komponentti virtuaalitodellisuudelle, että se voidaan nähdä VR:n määritelmän osana, eikä virtuaalitodellisuutta tulisi määritellä vain laitteiston perusteella [72]. Hän määrittelee VR:n tietyn tyyppisenä kokemuksena teknologian sijasta. Läsnaolon tunne voi syntyä kirjoituksesta (kirjeet, lehdet), kuuloaistin kautta (puhelut, levyt) tai vaikka elokuvista ja videopeleistä. Virtuaalitodellisuus määritellään tällöin simuloituna ympäristönä, jossa käyttäjä kokee etäläsnaolon tunteen. Tästä näkökulmasta vuorovaikutus keinotekoisien maailman kanssa tarjoaa kokijalle uppoutumisen tunteen ja tietokonemaailmasta tulee käyttäjän maailma. Immersio on tällöin ihmisen ja ympäristön välisen vuorovaikutuksen

tulos eikä VR:n teknologinen komponentti. Koska immersio edistää ”siellä olemisen” tunnetta virtuaaliympäristössä, läsnäoloa pidetään ominaisuutena, joka nousee immersioista, ja ”siellä olemista” tehostaa mahdollisuus ”siellä toimimiseen” [75].

Läsnäolosta keskusteltaessa voidaan ajautua pohtimaan sitä, että ihmisen käsitys todellisesta maailmasta on vain aistihavaintojen perusteella saatu karkea käsitys, eikä todellinen maailma itsessään. Näin pitkälle menevä filosofinen keskustelu ei kuitenkaan ole tämän tutkimuksen aihepiirissä. Riittänee, kun todetaan, että käyttäjä kokee virtuaalitodellisuuden samojen aistiprosessien kautta kuin todellisenkin maailman. Waterworthin ja Waterworthin mallissa [79] läsnäolon tunne nousee siitä, kun henkilön huomio on kiinnittynyt sen hetkiseen ulkoiseen maailmaan hänen ympärillään eikä sisäiseen ajatusten ja mielikuvien maailmaan. Tällöin ei ole merkitystä sillä, onko ulkoinen maailma todellinen vai virtuaalinen.

Koska virtuaaliympäristössä ihmisen havainto-, kognitio- ja psykomotoriset kyvyt voidaan projisoida kaukasiin, vaarallisiin tai simuloituihin ympäristöihin [13], läsnäolon tunne voi olla yksinkertaisesti ympäristössä tuetun ja onnistuneen toiminnan seuraus [11]. Kun käyttäjä on uppoutunut virtuaaliympäristöön, hänen havaintonsa itsestään on erottamaton ympäristön havainnoinnista [75]. Läsnäolon tunne syntyy, kun käyttäjä mielessään ajattelee toimimista virtuaalimaailmassa. Läsnäolon tunteen todellinen aiheuttaja on vuorovaikutus [56, 72]. Siksi läsnäolon tunne virtuaaliympäristössä on prosessi, jossa aktiivisesti tukahdutetaan todellinen maailma ja muodostetaan joukko toimintamalleja välittömän aistiärsyksen perusteella [11].

Tätä lähestymistapaa seuraten Riva ja Waterworth ([51, 52]) määrittelevät läsnäolon kehittyneenä neuropsykologisena prosessina, jonka tavoitteena on ohjata kokijan toimintaa. Tämä saavutetaan suodattamalla ja järjestelemällä aistidatan virtaa: mitä enemmän tämä prosessi erottaa itsen ulkomaailmasta, sitä suurempi on läsnäolon tunteen kokemus. Rivan ja Waterworthin mukaan kyky tuntea olevansa ”läsnä” virtuaalimaailmassa ei periaatteessa eroa kyvystä tuntea olevansa ”läsnä” oikeassa maailmassa.

### **Läsnäolon tunteeseen vaikuttavat muuttujat**

Yleisesti ottaen läsnäolon tunteeseen vaikuttavat muuttujat jaetaan kahteen ryhmään: käyttäjän ominaisuuksiin ja ilmaisuvälineen ominaisuuksiin. Lisäksi ilmaisuvälineen ominaisuudet voidaan jakaa sen muotoon ja sisältöön liittyviin muuttujiin [11, 29].

Läsnäolon tunteeseen vaikuttavia käyttäjän ominaisuuksia ovat esimerkiksi:

- keskittymiskyky,
- havainnointiin liittyvät kyvyt kuten stereonäkö,
- aikaisempi kokemus virtuaalitodellisuudesta,



- aikaisempi kokemus suoritettavista tehtävistä,
- odotukset siitä, miltä virtuaalinen kokemus tulee tuntumaan,
- taso, jolla käyttäjä suuntaa huomionsa keinotodellisuuden tapahtumiin, ja
- taipumus liikepahoinvointiin.

Jotkut tutkijat ovat sitä mieltä, että henkilön täytyy tietoisesti siirtää kokemansa ”epäusko” taka-alalle, jotta läsnäolon tunteminen virtuaaliympäristössä toimittaessa olisi mahdollista [22]. Lisäksi läsnäolon tunne riippuu merkityksestä, jonka käyttäjä antaa ärsykeille, joita hänelle esitetään [11]. Witmerin ja Singerin [82] mukaan käyttäjän kyky ja halu keskittyä tehtävään voi lisätä läsnäolon tunnetta, koska keskittyessään käyttäjä samalla sulkee ulkoiset häiriötekijät huomionsa ulkopuolelle. Koska läsnäolon tunteeseen vaikuttavia käyttäjän ominaisuuksia on useita, virtuaalimaailman kokemus on lopulta hyvin henkilökohtainen. Vaikka käytössä olisi identtinen teknologia, kahden käyttäjän kokeman läsnäolon taso tuskin olisi täsmälleen sama. Tämä henkilökohtaisuus vaikeuttaa eri järjestelmien vertailua, jos mitataan vain käyttäjien omaa arviota läsnäolon tunteesta [11]. Esimerkiksi erilaisista pelkotiloista kärsivät henkilöt kokevat enemmän läsnäolon tunnetta virtuaaliympäristössä, joka tuottaa kyseisen pelkotilan, kuin henkilöt, joilla pelkotilaa ei ole [1]. Tällaiset tekijät on huomioitava verrattaessa eri virtuaaliympäristöjä.

Ilmaisuvälineen muotoon liittyvät ominaisuudet voidaan ryhmitellä seuraaviin muuttujiin [11, 29]:

- aistikanavien määrä ja laatu (yleensä näkö, kuulo ja tunto; harvemmin haju ja maku)
- kuvallinen realismi,
- järjestelmän vasteaika,
- käyttäjän paikannus,
- ympäristön vuorovaikutteisuus,
- ohjaustapa ja
- näkökentän koko.

Ilmaisuvälineen sisältöön liittyvät ominaisuudet voidaan ryhmitellä seuraaviin muuttujiin:

- käyttäjän kehon esitysmuoto,
- ympäristön autonomian taso,

- sosiaaliset elementit kuten se, miten muut virtuaaliympäristön toimijat reagoivat käyttäjään,
- muiden käyttäjien paikallaolon taso,
- keinotodellisuudessa suoritettavan tehtävän tai toiminnan luonne ja
- sisällön merkityksellisyys.

## Sujuvuus

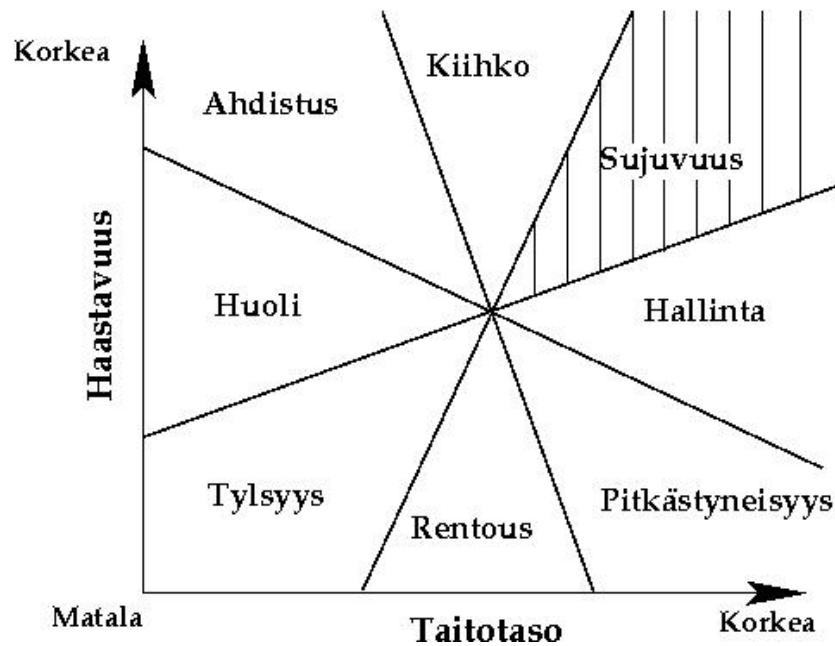
Läsnäolon käsitteeseen läheisesti liittyvä käsite on sujuvuus (engl. *flow*) [74]. Sujuvuus on dynaaminen tila, jossa yksilön huomio on täysin keskittynyt käsillä olevaan tehtävään, jolloin tietoinen prosessointikapasiteetti nousee normaalitason yläpuolelle ja älyllisestä suorittamisesta tulee helpompaa ja miellyttävämpää [12]. Sujuvuuden tunteen syntymiselle ovat tyypillisiä tietyt elementit [45]:

1. haasteellinen ja taitoja vaativa toiminta,
2. toiminnan ja huomion sulautuminen,
3. selkeät tavoitteet ja välitön palaute,
4. keskittyminen käsillä olevaan tehtävään,
5. hallinnan tunne,
6. itsetietoisuuden katoaminen,
7. ajantajun hämärtyminen ja
8. palkitseva kokemus.

Sujuvuudessa on kyse tasapainosta henkilön taitojen ja niiden haasteiden välillä, joita tietyn tilanteen rajoitettu herätekenttä aiheuttaa. Kuvassa 1.4 on esitetty kahdeksankanavainen malli kokemuksen analysoimiseksi [41] (muitakin malleja on, kuten Hoffmanin ja Novakin malli [47]). Sujuvuuden tunteeseen päästään, kun korkean taitotason omaava henkilö suorittaa riittävän haastavaa tehtävää. Tätä pidetään optimaalisena kokemuksena, jonka pitäisi mahdollistaa suoritustason nousun korkealle.

Sujuvuuden käsitettä on ehkä käytetty enemmänkin psykologian alalla kuin virtuaalitekniikan piirissä. Termi on yleinen tutkimuksissa, jotka koskevat käyttäjien kokemuksia tietokoneiden käytössä työtehtäviin [18]. Lisäksi sujuvuutta on tutkittu esimerkiksi verkkosivustojen käytettävyyttä arvioitaessa [27].

Toiset tutkijat ovat määrittäneet (etä)läsnäolon tunteen sujuvuuden tunteen edeltäjäksi, kun taas toiset ovat mallintaneet (etä)läsnäolon sujuvuuden komponentiksi. Nah ja muut ovat kirjoittaneet laajan yhteenvedon eri tutkimuspapereissa käytetyistä sujuvuuden ja läsnäolon tunteiden suhteista toisiinsa [45].



Kuva 1.4: Kokemus taitotason ja tehtävän haastavuuden välisenä suhteena.

### Yhteenveto läsnäolon määritelmistä

Rationalistisen (*medialähtöinen läsnäolo*) ja psykologisen (*sisäinen läsnäolo*) näkökulman välillä on huomattava käsitteellinen ero. Coelho ja muut [11] toteavat, että tietyt asiat tuntuisivat olevan olennaisimpia määrääviä tekijöitä läsnäolon tunteelle: useiden aistikanavien käyttö (erityisesti näkö, kuulo, tunto), immersio (poistamalla virtuaaliympäristön ulkopuoliset ärsykkeet), egosentrinen eli käyttäjään keskitetty sijainti ja mahdollisuus toimia ympäristössä (joka tuottaa vasteen toiminnoille). Rationalistisen näkökulman mukaan läsnäolo ei ole välttämätön VR-järjestelmän määrittelylle vaan se on virtuaalitodellisuuden fysikaalisten ominaisuuksien eli immersiiivisten ärsykkeiden tuottama toissijainen ilmiö. Sitä vastoin psykologisen näkökulman mukaan läsnäolo määritellään mahdollisena kokemuksena VR-järjestelmän ulkopuolella.

Vaikka itse määritelmä on kiistanalainen, läsnäoloon vaikuttavista muuttujista ollaan yksimielisempiä. Teknologisia muuttujia on lukuisia. Lisättäessä aistipalauttekanavia on pidettävä huolta, että esityksen konsistenssi säilyy. Ristiriitainen aistipalaute todennäköisesti heikentää kokonaiskokemusta merkittävästi.

## 2. TUTKIMUKSEN TAVOITTEET

Tutkimuksen ensimmäinen tavoite on selvittää kirjallisuuskatsauksen avulla, miten virtuaaliympäristössä koettua läsnäolon tunnetta yleisesti mitataan. Toisena tavoitteena on selvittää, miten virtuaaliympäristön immersiotaso vaikuttaa toisaalta käyttäjän läsnäolon tunteeseen ja toisaalta työkonesimulaattorilla tehtyjen tehtävien suoritustasoon. Simulaattoreiden kehittämisen kannalta on kiinnostavaa selvittää suhdetta virtuaaliympäristön parametrien, käyttäjän kokemusten ja suoritusten onnistumisen välillä. Näin saatua informaatiota voidaan hyödyntää kehitettäessä simulaattoreita rajallisilla resursseilla, koska se auttaa kohdentamaan resursseja niihin asioihin, joilla on merkitystä asetettujen tavoitteiden kannalta [31]. Läsnäolon tunteen ja suoritustason välinen yhteys riippuu joka tapauksessa myös sovelluksesta: esimerkiksi lennonvalvontajärjestelmien virtuaalinäytöissä epäolennaisen informaation poistamisen on havaittu parantavan suoritustasoa, vaikka koettu läsnäolon tunne samalla heikkenee [15]. Banerjeen ja muiden tutkimuksessa [2] verrattiin immersiotason, läsnäolon tunteen ja konseptisuunnitteluvaiheen mallin ymmärtämisen välistä suhdetta. Havaittiin, että vaikka immersion lisääminen parantaa läsnäolon kokemusta ja läsnäolon tunteen ja mallin ymmärtämisen välillä on selvä korrelaatio, kuitenkin koehenkilöt saivat paremmat pisteet mallin ymmärtämisestä mittavasta kyselystä alhaisemman immersiotason esityksen perusteella. Myöskään työkonesimulaattorin tapauksessa ei ole ennalta käsin selvää, miten esimerkiksi läsnäolon tunnetta mahdollisesti parantavat tekijät vaikuttavat simulaattorilla suoritettavien tehtävien onnistumiseen.

### 3. KOETUN LÄSNÄOLON TUNTEEN MITTAAMINEN

Koetun läsnäolon tunteen mittaamiseen ei ole yksiselitteisesti oikeaa ja joka tilanteessa toimivaa menetelmää. Mittaustapa riippuu myös siitä, mitä määritelmää läsnäolon tunteesta käytetään, ja siitä, mitä tuloksilla halutaan saavuttaa tai osoittaa. Seuraavissa luvuissa käydään lyhyesti läpi yleisimpiä tapoja läsnäolon mittaamiseen. Yleisesti käytetyin menetelmä kirjallisuudessa vaikuttaisi olevan erilaisilla kyselylomakkeilla tapahtuva itsearviointi. Itsearviointia voidaan suorittaa myös muilla tavoin kuin lomakkeiden avulla. Lisäksi henkilön kokemaa läsnäolon tunnetta voidaan arvioida esimerkiksi tarkkailemalla häntä ja jopa mittaamalla tiettyjen fysiologisten suureiden arvoja kokeiden aikana.

#### 3.1 Kyselylomakkeen käyttöön perustuvat menetelmät

Witmer ja Singer [82, 81] kehittivät ITQ-lomakkeen lisäksi PQ-lomakkeen (engl. *Presence Questionnaire*, liite B), jota on yleisesti käytetty läsnäolon tunnetta virtuaaliympäristöissä koskevissa tutkimuksissa. Esimerkiksi Vora ja muut ovat tutkineet näitä lomakkeita käyttäen immersion ja läsnäolon tunteen suhdetta kokeessa, jossa piti etsiä vikoja virtuaalisen lentokoneen lastiruumasta [78]. PQ-lomakkeessa on 32 kysymystä, jotka koskevat käyttäjän kokemusta virtuaaliympäristöstä. Kysymykset jakautuvat neljään osa-alueeseen:

1. Ohjausta ja hallintaa koskevat kysymykset käsittelevät sitä, missä määrin käyttäjä kokee pystyvänsä hallitsemaan tapahtumia virtuaalimaailmassa, miten välittömästi toiminnan seuraukset ovat nähtävissä, miten odotetusti tapahtumat etenevät, miten luonnollinen vuorovaikutustapa virtuaaliympäristön kanssa on ja missä määrin käyttäjä pystyy vaikuttamaan objekteihin.
2. Aistipalautetta koskevissa kysymyksissä tarkastellaan palautekanavien määrää ja laatua, ympäristön tarjoaman informaation runsautta, multimodaalisen aistipalautteen yhtenevyyttä, käyttäjän liikkumista ja virtuaaliympäristön tarkastelumahdollisuuksia.
3. Häiriötekijöitä kartoitetaan kysymyksillä siitä, missä määrin käyttäjä tuntee

itsensä eristetyksi todellisesta maailmasta, miten hän pystyy keskittymään virtuaalimaailmaan ja sulkemaan häiriöt huomionsa ulkopuolelle ja kuinka paljon käyttäjä on tietoinen vuorovaikutukseen käytettävistä laitteista.

4. Realismia koskevissa kysymyksissä käsitellään virtuaalimaisen todellisuudentuntua, virtuaaliympäristöstä saatavan informaation yhtenevyyttä todellisen maailman kanssa, virtuaalisen kokemuksen tarkoituksenmukaisuutta ja virtuaalisesta takaisin todelliseen maailmaan siirtymisen vaikutusta.

Witmer ja muut [81] tutkivat myöhemmin PQ-asteikon rakennetta pääkomponenttianalyysin keinoin ja tunnistivat neljä pääkomponenttia eli sivuasteikkoa, joilla lomake mittaa läsnäolon tunnetta: osallisuus, aistipalautteen tarkkuus, sopeutuminen/immersio sekä käyttöliittymän laatu.

Lomakkeen vastauksissa käytetään seitsenkohtaista asteikkoa, joka perustuu semanttisen eron periaatteeseen. Asteikon alku- ja loppupää on ankkuroitu toisilleen vastakkaisilla sanallisilla kuvauksilla. Lisäksi asteikon keskelle on myös merkitty sanallinen kuvaus. Kuvaukset on muotoiltu siten, että ne vastaavat kulloiseenkin kysymykseen. Esimerkki kysymyksestä on *Kuinka ristiriitaista oli eri aistien kautta tullut informaatio?*, johon vastausasteikon alku-, keski- ja loppuosan kuvaukset ovat *Todella ristiriitaista*, *Melko ristiriitaista* ja *Ei ollenkaan ristiriitaista*. Vastaaajan tehtävän on merkitä rasti siihen kohtaan asteikkoa, joka hänen mielestään parhaiten vastaa kokemusta kyseisestä virtuaaliympäristöstä.

Läsnäolon mitan korrelaatiosta muiden virtuaaliympäristöihin liittyvien muuttujien ja rakenteiden kanssa Witmer ja Singer tuovat esiin seuraavat tutkimustulokset [82]:

- Yleensä läsnäolon tunteen ja suoritustason välillä on jonkin asteinen positiivinen korrelaatio. Koska suoritustasoon vaikuttavat monet tekijät kuten yksilön taidot ja kyvyt, korrelaatio ei aina ole merkittävällä tasolla.
- Simulaattorisairaus tarkoittaa pahoinvointia, jonka henkilö kokee simulaatorissa. Se voi johtua toisaalta siitä, että simuloidaan tarkasti reaali maailman ympäristöä, joka aiheuttaisi liikesairautta oikeastikin, tai simulaation epätarkkuudesta, joka aiheuttaa ristiriitaa aistien tuottaman informaation välille [14]. Henkilöt, jotka kärsivät helposti simulaattorisairaudesta, kokevat vähemmän läsnäolon tunnetta virtuaaliympäristössä. Tämä johtunee siitä, että pahoinvoinnin oireet kääntävät henkilön huomion itseensä ja vähentävät osallistumisen tunnetta virtuaalimaailman tapahtumiin.
- Vuorovaikutusmenetelmän luonnollisuus ei, yllättävää kyllä, aina korreloi positiivisesti läsnäolon tunteen kanssa.

- Henkilön immersiiivisiä taipumuksia mittaavan ITQ-lomakkeen tulokset korreloivat PQ-lomakkeen tulosten kanssa. Toisin sanoen ihmiset, joilla on taipumusta uppoutua ja keskittyä tekemisiinsä voimakkaasti, kokevat enemmän läsnäolon tunnetta virtuaaliympäristöissä. Tämä yhteys löytyi esimerkiksi Voran ja muiden tutkimuksessa [78], jossa koehenkilöiden tehtävänä oli etsiä vikoja lentokoneen virtuaalisesta ruumasta.
- Navigointitehtävissä virtuaaliympäristöissä ei löytynyt korrelaatiota avaruudellisen hahmotuskyvyn ja läsnäolutulosten välillä. Myöskään törmäysten määrä kuljettaessa reittiä virtuaalirakennuksessa ei korreloinut PQ-lomakkeen tulosten kanssa.

Toinen PQ-lomakkeen tyyppinen kyselymenetelmä on Lessiterin ja muiden kehittämä ITC-SOPI-lomake (engl. *ITC-Sense of Presence Inventory*). Se sisältää yhteensä joko 63 tai 44 kysymystä versiosta riippuen. Kysymykset on muotoiltu siten, että vastausasteikko on jokaiselle kysymykselle sama. Käytössä on Likert-tyyppinen viisikohtainen asteikko, jossa 1 tarkoittaa, että vastaaja on vahvasti eri mieltä väittämän kanssa ja 5 vastaavasti osoittaa vastaajan olevan vahvasti samaa mieltä. Lomakkeen kysymykset jakautuvat neljään mitattavaan osa-alueeseen: 1) tunne mediajärjestelmän kuvaamassa fyysisessä tilassa olemisesta, 2) tunne osallisuudesta kuvattun ympäristön sisältöön eli ”tarinaan”, 3) tunne ympäristön ja sen tapahtumien kuvauksen luonnollisuudesta ja uskottavuudesta sekä 4) immersiiiviseen ilmaisuvälineeseen liittyvät kielteiset kokemukset kuten silmien rasittuminen, päänsärky tai pahoinvointi. Lomakkeen käytettävyyttä rajoittaa se, että sitä ei julkaistu avoimesti vaan sen käyttöön piti erikseen saada lupa lomakkeen tekijänoikeuksia hallitsevalta ITC:ltä<sup>1</sup> (*Independent Television Commission*), joka lakkasi olemasta vuonna 2003.

Slaterin ja muiden [69] kehittämässä UCL-läsnäolokyselyssä (*University College London*) on vain kolme keskeistä kysymystä, jotka on sijoitettu muiden kysymysten joukkoon tarkoituksena varmistaa vastausten riippumattomuus toisistaan tilastollista analyysiä varten. Ensimmäinen kysymys koskee tunnetta olemisesta tietokoneella luodussa maailmassa, toinen sitä, kuinka taajaan keinotodellisuus tuli todellisemmaksi kuin ”oikea maailma” ja kolmas sitä, tuntuiko virtuaalimaailma enemmän joltakin, jota katseltiin vai joltakin, jossa vierailtiin. Vastaukset annetaan vastaavan tyyppisellä seitsenportaisella asteikolla kuin PQ-lomakkeessa, mutta läsnäolon mitaksi lasketaan vain niiden vastausten määrä, jotka osuvat asteikon arvoihin 6 tai 7. Tällöin päästään eroon siitä, että järjestysasteikon vastausta käytettäisiin mitattuna muuttujana regressioanalyysissä. Sen sijaan muuttujaa pidetään ”onnistumisten”

---

<sup>1</sup>Järjestö, joka vastasi kaupallisen televisiotoiminnan lisensoinnista ja säätelystä Isossa-Britanniassa.

(vastausten 6 ja 7) määränä kolmessa kokeessa eli läsnäoloa koskevissa kysymyksissä.

Baños ja muut lähtivät liikkeelle 77-kohtaisesta lomakkeesta, jolla mitattiin läsnäolon tunnetta sekä kokemuksen todellisuudentuntua. [5]. Vastausasteikko oli Likert-tyyppinen asteikko 0:sta ("ei ollenkaan") 10:een ("täydellisesti"). Kysymykset liittyivät todellisuuden arvioinnin käsitteeseen, läsnäolon käsitteeseen, tunneperäiseen osallisuuteen, vuorovaikutukseen, hallintaan, tarkkaavaisuuteen ja keskittymiseen, aistihavaintojen ja vuorovaikutuksen realismiin, aistihavaintojen yhtenevyyteen ja jatkuvuuteen sekä odotuksiin ja tapahtumien ennustettavuuteen. Käyttäjäkokeiden pohjalta suoritettua faktorianalyysin perusteella lopulliseen kyselylomakkeeseen päätyi viisi läsnäolon tunteeseen ja viisi kokemuksen todellisuudentuntuun liittyvää kysymystä.

### 3.2 Jatkuva itsearviointi

Läsnäolon tunnetta voidaan mitata monilla muillakin tavoin kuin kysymyslomakkeilla. Jos halutaan reaaliaikaista tietoa käyttäjän kokeman läsnäolon tunteen vaihtelusta virtuaalisen kokemuksen aikana, pitää mittauksen olla jatkuvaa. Eräs käytetty menetelmä on jatkuva itsearviointi, jossa koehenkilö ohjaa kädellään liukukytkintä osoittamaan numeerista arvoa esimerkiksi välillä 0...100 kokemansa läsnäolon tunteen tason mukaisesti [28]. Ongelmaksi tällöin muodostuu se, että käyttäjä joutuu jakamaan huomionsa keinotodellisuuden ja liukukytkimen välille, jolloin koettu läsnäolon tunne todennäköisesti vähenee. Samantapainen arviointi voidaan toteuttaa ilman ohjainlaitetta siten, että käyttäjälle esitetään joukko herätteitä ja pyydetään häntä kuvaamaan numeerisella arvolla subjektiivisen kokemuksensa voimakkuus jokaisen herätteen jälkeen [29]. Kolmas tapa on yhdistää erilaisia modaliteetteja siten, että käyttäjää pyydetään säätämään esimerkiksi tietyn äänen voimakkuutta kokemansa läsnäolon tunteen tasolle [71].

Keinotodellisuuteen uppoutunut ihminen saattaa havahtua jonkin ulkoisen ärsyksen takia huomaamaan, että onkin oikeasti laboratoriossa suorittamassa koetta eikä siinä ympäristössä, mikä virtuaalisesti esitetään. Tällaisia katkoja läsnäolon tunteessa voivat aiheuttaa esimerkiksi taustalta kuuluvat äänet, kypäränäytön painon tunne, virtuaalimaailman jonkin yksityiskohdan havaitseminen epärealistiseksi tai se, että käyttäjä joutuu käyttämään jotakin laitetta tietyn tehtävän suorittamiseen. Slater ja Steed [68] käyttivät näiden katkojen määrää tietyn tehtävän suorittamisen aikana sen mittarina, kuinka voimakkaasti koehenkilöt kokivat olevansa läsnä virtuaaliympäristössä. Tässä lähestymistavassa ei huomioida sitä, että koehenkilö voi periaatteessa samaan aikaan olla osittain läsnä sekä todellisessa että virtuaaliympäristössä ja reagoida molempien tapahtumiin, jolloin läsnäolo ei ole välttämättä kaksiarvoinen muuttuja. Spagnoli ja Gamberini [70] jopa määrittelevät läsnäolon



prosessiksi eikä tilaksi. Heidän mukaansa vaikka käyttäjä keskeyttäisi toimintansa virtuaaliympäristössä mutta samalla ilmentää jatkuvaa osallisuutta toiminnan seurauksiin, hän on edelleen virtuaalisessa tilassa.

### 3.3 Käyttäjän reaktioiden tarkkailuun perustuvat menetelmät

Nichols ja muut [46] vertasivat läsnäolon mittareina kyselylomaketta, käyttäjän refleksivastetta yllättävään tapahtumaan sekä sitä, huomaako koehenkilö taustamusiikin vaihtumisen tehtävän aikana. Testisovelluksena oli virtuaalinen ankanmetstäys sekä kypäränäytöllä että työpöytänäytöllä. Yllättävä tapahtuma oli ankan liikkuminen satunnaisella hetkellä nopeasti kohti katsojaa ja räjähtäminen kappaleiksi. Käyttäjän vaste luokiteltiin johonkin kolmesta kategoriasta: 1) ei reaktiota, 2) sanallinen reaktio tai 3) fyysisesti havaittava reaktio. Tuloksista havaittiin, että mitä korkeampi oli lomakkeella mitattu läsnäolon taso, sitä suurempi oli testihenkilön reaktio yllättävään tapahtumaan ja vastaavasti sitä huonommin muistettiin taustamusiikki. Nämä läsnäolon mittarit siis korreloivat keskenään.

Vastaavasti voidaan tarkkailla käyttäjän fyysisiä ja sanallisia reaktioita virtuaalisen jyrkänteen reunalle saavuttaessa [69]. Hodges ja muut [24] tutkivat virtuaaliympäristön käyttöä korkean paikan kammoa potevien henkilöiden hoidossa. Koehenkilöiden läsnäolon tunnetta virtuaalisessa hississä, parvekkeilla ja silloilla mitattiin tutkimalla fyysisten ahdistusoireiden (hikoilu, ”perhoset vatsassa”, huimaus, sydämentykytyks, levottomuus, vapina, pelko, polvien heikotus, kiristyksen tunne rinnassa sekä jännittyneisyys) määrää ja tyyppiä. Koska testihenkilöiden tuntemukset virtuaalitulassa vastasivat aitoa kokemusta eli läsnäolon tunne oli voimakas, voidaan keinotodellisuutta hyödyntää ahdistustilojen hoidossa tarjoamalla turvallinen paikka altistua asteittaisesti vaaralliselta tuntuvalle tilanteelle.

Bouchard ja muut [7] vertasivat käärmekammoisten ihmisten reaktioita virtuaalisella aavikolla, jossa joko ilmoitettiin tai ei ilmoitettu olevan piileskeleviä käärmeitä. Koehenkilöiden ahdistuksen ja läsnäolon tunteiden tasoa mitattiin kysymyksillä *Missä määrin tunnet olevasi läsnä virtuaaliympäristössä juuri nyt?* ja *Missä määrin tunnet ahdistusta juuri nyt?* kokeen aikana ja sen jälkeen. Lisäksi kokeen jälkeen täytettiin PQ-lomake. Tuloksista huomattiin, että PQ-lomakkeen kysymysten sanamuotoihin on syytä kiinnittää huomiota. Esimerkiksi vastaukset kysymykseen *Missä määrin pystyit kontrolloimaan tapahtumia?* olivat alhaisella tasolla, vaikka henkilöt kokivatkin voimakasta läsnäolon tunnetta ja siksi suurempaa ahdistusta uhkaavien käärmeiden vuoksi. Tämä ilmeisesti johtui siitä, että pelkotila loi ihmisille tunteen siitä, että tapahtumat ovat hallitsemattomia. Tässä koeasetelmassa tapahtumien hallinnan ja läsnäolon tunteet olivat siis toisilleen vastakkaisia.

### 3.4 Fysiologisten reaktioiden mittaamiseen perustuvat menetelmät

Koehenkilöiden subjektiivisista omien tuntemuksien arvioista päästään eroon, jos mitataan suoraan fysiologisia reaktioita. Wiederholdin ja muiden tutkimuksessa [80] mitattiin koehenkilöiden sydämen lyöntitiheyttä, hengitystaajuutta, ihon ulkolämpötilaa ja ihon sähkönjohtavuutta (joka laskee hikirauhasten toiminnan lisääntyessä) lentosimulaatiossa, joka esitettiin sekä kypäränäytöllä että työpöytänäytöllä. Ainut suure, joka kuvasti muutoksia käyttäjien vireystasoissa oli ihon sähkönjohtavuus. Sekään ei kuitenkaan eronnut olennaisesti kypärä- ja työpöytänäyttöjen välillä. Kokeeseen osallistuneiden henkilöiden vähäinen määrä lisäksi vähentää tulosten yleistettävyyttä. Meehan ja muut [43] vertasivat kokeeseen osallistuneiden henkilöiden reaktioita turvalliseksi koetussa virtuaalitulasssa ja syvän virtuaalisen kuopan reunalla. Mitatuista suureista sydämen lyöntitiheys osoittautui parhaaksi läsnäolon mittariksi. Myös ihon sähkönjohtavuuden muutos toimi jollakin tasolla; ihon lämpötilan muutos sen sijaan ei. Kuten Bouchard ja muut [7] huomauttavat, on kuitenkin muistettava, että edellä mainitut fysiologiset ilmiöt liittyvät varsinaisesti pelon tai jännityksen tunteeseen ja ainoastaan välillisesti läsnäolon tunteeseen. Jotta löytyisi fysiologisia parametreja, jotka vastaavat suoraan koettuun läsnäolon tunteeseen, pitäisi ne löytää ensin mittaamalla todellisen maailman kokemusta, jossa määritelmän mukaan läsnäolon tunteen pitäisi normaalioloissa olla huipussaan. Jos sitten keinotodellisuudessa nämä fysiologiset tekijät pysyisivät samoina kuin reaali maailman tilanteessa, olisi koettu läsnäolon tunne korkea. Ja tietenkin näiden tekijöiden pitäisi myös osoittaa se, kuinka epäaidossa virtuaaliympäristössä läsnäolon tunne on pienempi. On ymmärrettävää, että tällaisten fysiologisten tekijöiden löytäminen ei ole helppoa.

Jos ihminen kokee keinotodellisuudessa olevansa jonkin liikkuvan laitteen kyydissä, hän saattaa eläytyä kokemukseen myötäilemällä laitteen liikkeitä vaikka todellisuudessa olisikin paikallaan. Sama ilmiö voi toisaalta aiheuttaa simulaattorisairautta. Freemanin ja muiden tutkimuksessa [17] koehenkilöille näytettiin kuvaa kilparadalla ajavasta autosta sekä kaksiulotteisena että kolmiulotteisena kuvana sekä verrattiin heidän vartaloidensa liikettä ajon aikana ja ajon jälkeen kyselylomakkeella raportoituja läsnäolon määriä. Tulokset osoittivat, että stereoskopisen informaation lisääminen lisäsi sekä vartalon liikkeitä että subjektiivista läsnäolon tunteen määrää. Kuitenkaan yksittäisten koehenkilöiden kohdalla ei löytynyt korrelaatiota siinä, missä määrin stereoskopia lisäsi toisaalta liikkeitä ja toisaalta läsnäolon tunnetta. Eli ne henkilöt, jotka liikkuiivat suhteessa enemmän kolmiulotteista kuin kaksiulotteista kuvaa käytettäessä eivät välttämättä itse kokeneet läsnäolon tunteessa yhtä voimakasta kasvua. Freeman ja muut esittävät tästä päätelmänä, että vartalon liikkeitä

voidaan käyttää verrattaessa eri näyttöjen ominaisuuksia, mutta ne eivät korvaa subjektiivisia läsnäolon mittareita.

### 3.5 Muut menetelmät

Turingin testi on tekoälytutkimukseen liittyvä koe, jossa ihminen kommunikoi tekoälyjärjestelmän kanssa kirjoittamalla tietämättä, onko hänelle vastaamassa ihminen vai kone. Mikäli ihminen ei pysty koneen vastauksien perusteella päättämään, että kyseessä on tekoäly, sanotaan, että kone on älykäs. Vastaavasti joskus puhutaan virtuaalitodellisuuden Turingin testistä, jossa koehenkilön pitää erottaa, onko hänelle esitetty näkymä todellinen vai virtuaalinen. Schloerb [55] esitti, että subjektiiviseksi läsnäolon mittariksi kävisi todennäköisyys, jolla ihmisoperaattori kokee olevansa fyysisesti läsnä tietyssä etäympäristössä. Koska todellista maailmaa ei helposti sekoiteta virtuaaliseen, hän ehdotti käytettäväksi havainnointiin liittyviä rajoitteita tai suodattimia. Tällöin sekä todellista että virtuaalista ympäristöä tarkasteltaisiin esimerkiksi rajoitetun näkökentän kautta, ilman ääniä tai siten, että kuvan kontrastia tai värejä on vähennetty. Tällöin ongelmaksi tulee se, että varsinaisen läsnäolon tunteen sijasta ollaan mittaamassa sitä, miten hyvin koehenkilö erottaa esimerkiksi kaksi huonolaatuista kuvaa toisistaan.

Muita keinoja läsnäolon tunteen mittaamiseen ovat esimerkiksi

- koehenkilöiden keinotodellisuuden kokemuksistaan kirjoittamien kirjoitelmien analysointi [64],
- koehenkilön suorituksesta tehdyn videotallenteen analysointi jälkeenpäin yhdessä hänen kanssaan [50] ja
- silmän liikkeiden analysointi fraktaalilaskennan keinoin [49].

## 4. IMMERSIOTASON VAIKUTUS KAIVOSKONESIMULAATTORISSA

Kaivoksissa käytetään suuria työkoneita kuten kuormaajia ja maansiirtokoneita vaikeissa olosuhteissa. Pimeät ja ahtaat kaivoskäytävät ja kuumat ja pölyiset työolosuhteet asettavat omat haasteensa koneen kuljettajalle. Kuvassa 4.1 on Sandvik Mining and Construction Oy:n kuormaaja LH410. Kuten kuvan koneessa, tällaisissa työkoneissa on tyypillisesti pieni ja ahdas ohjaamo. Suunniteltaessa maanalaisissa kaivoksissa käytettäviä koneita pyritään minimoimaan koneen kokoa sieltä, mistä pystytään. Kauhan ollessa ala-asennossa ohjaamo on koneen korkein kohta ja määrää sen, minkä korkuiseen kaivoskäytävään kone mahtuu.

Ohjaamon ahtaus luonnollisesti vaikeuttaa kuljettajan työtä. Ohjaamossa istutaan sivuttain. Tilanpuutteen vuoksi istuin ei voi olla kääntyvä, jolloin kuljettajan on kumpaankin suuntaan ajaessaan käännettävä päätänsä. Käytettävyyden ja työergonomian kannalta hallintalaitteiden sijoittelulla on tällöin keskeinen merkitys. Kauhan suuntaan katsottaessa ylös nostettu kauha peittää näkökentän ikkunasta melkein kokonaan.

Virtuaaliympäristöön sijoitettua simulaattoria voidaan kuormaajan tapauksessa hyödyntää niin hallintalaitteiden optimaalisessa sijoittelussa kuin näkyvyystarkasteluissakin. Simulaattoria käyttää aina ihminen, ja jotta sillä tehtävistä kokeista saadut tulokset vastaisivat mahdollisimman hyvin todellisuutta, pitäisi käyttäjälle saada luotua mahdollisimman aito tunne oikean koneen käytöstä. Seuraavissa kappaleissa esitellään TTY:n konstruktiotekniikan laitoksella rakennettu kaivoskonesimulaattori ja sillä tehdyt käyttäjäkokeet, joissa tutkittiin virtuaaliympäristön immersiotason vaikutusta käyttäjän kokemaan läsnäolon tunteeseen ja suoritustasoon. Immersio on siis tässä tutkimuksessa Slaterin [66] määritelmän mukaisesti ympäristön ominaisuus.

### 4.1 Laitteisto ja järjestelmä

Virtuaalinen maailma muodostuu kolmisenäisen virtuaaliympäristön välityksellä. Sen seinät ovat kankaita, joiden läpi kuva projisoidaan taustaprojektiota käyttäen. Taustaprojektion etuna on se, että virtuaalitulassa olevat ihmiset ja laitteet eivät pääse muodostamaan varjoja, jotka peittäisivät projisoitavaa kuvaa. Seinät ovat suurikokoisia ja kohtisuorassa toisiinsa nähden, minkä ansiosta käyttäjän on helppo



Kuva 4.1: Kuormaaaja kaivoksessa. Kuva: Sandvik.

uppoutua virtuaalimaailmaan. Toiminnallinen näkökenttä simulaattorissa on reilusti yli 180 astetta. Péruchin ja Mestren tutkimuksessa [48] havaittiin, että 180 asteen toiminnallinen näkökenttä on selvästi parempi virtuaaliympäristössä tapahtuvan visuaalisen navigointitehtävän suorituksen kannalta kuin vertailukohtana olleet 120 asteen ja 60 asteen näkökentät. Lattia- ja kattoprojektoiden toteuttaminen olisi varsin kallista ja vaatisi huomattavasti lisää tilaa. Koska työkonesimulaattoreissa lattia- ja katonäkymät eivät ole käyttäjän näkökulmasta olennaisia, on kolmen seinän toteutus varsin riittävä.

Kolmiulotteinen vaikutelma virtuaalimaailmasta luodaan käyttämällä aktiivistereoprojektiota. Se tarkoittaa, että kukin projektori lähettää 120 Hz:n taajuudella kuvavirtaa, jossa joka toinen kuva on tarkoitettu vasemman ja joka toinen kuva oikean silmän nähtäväksi. Visualisointi-PC:llä on NVIDIA Quadro G-Sync -näytönohjain, joka huolehtii projektoreiden synkronoinnista. Virtuaalitilan käyttäjällä on päässään XPand X101 -suljinlasit, jotka sulkevat ja avaavat vuorotellen linssejään. Stereoemitteri lähettää suljinlaseille infrapunasignaalia, jolla lasien toiminta synkronoidaan kuvavirran kanssa siten, että aina vasemman linssin ollessa auki näkyy projektiokankailla vasemmalle silmälle tarkoitettu kuva. Vastaavasti oikea silmä näkee vain oikealle silmälle tarkoitettun kuvan. Kuvat poikkeavat toisistaan sen verran, kuin silmien välimatka toisistaan vaikuttaa niiden katselukulmaan. Kolmiulotteinen



Kuva 4.2: Pneumaattinen kuuden vapausasteen liikealusta.

vaikutelma syntyy, kun ihminen yhdistää kuvat aivoissaan.

Jotta virtuaalinäkymä saadaan kuvattua tarkalleen simulaattorin käyttäjän näkökulmasta, pitää tietää käyttäjän sijainti virtuaalitilassa. TTY:n simulaattorissa on käytössä optinen paikannus, joka on toteutettu NaturalPointin OptiTrack-kamerajärjestelmällä. Käyttäjän päässä olevissa suljinlaseissa on markkereita epäsymmetrisessä asetelmassa. Virtuaaliympäristöön on sijoitettu kuusi kameraa. Kun vähintään kaksi kameraa näkee markkerit, pystytään kuvien perusteella laskemaan käyttäjän täsmällinen paikka kolmiulotteisessa tilassa. Kun paikka on tiedossa, voidaan kuva projektionäytölle muodostaa sen mukaisesti. Tällöin käyttäjä voi esimerkiksi kurkistaa työkonen virtuaalisesta ikkunasta ja nähdä suuntiin, jotka muuten jäisivät piiloon. Äänimaailma luodaan 5.1-äänijärjestelmällä.

Työkonesimulaattorin keskeinen osa on liikealusta (kuva 4.2). Sen tarkoituksena on jäljitellä virtuaaliympäristössä työkonella ajettaessa käyttäjään kohdistuvia kiihtyvyyksiä ja absoluuttisia liikkeitä. Liikealustassa on kuusi pneumaattista toimi-



Kuva 4.3: Kaivoskonesimulaattori virtuaaliympäristössä.

laitetta, ”ilmalihasta”, joiden avulla alustaa voidaan liikuttaa kolmiulotteisessa koordinaatistossa sekä pyörittää kaikkien kolmen akselin suhteen. Kukin ilmalihaskone on kytketty pneumaattiseen proportionaalisuuntaventtiiliin. Venttiileitä ohjataan erilliseltä PC:ltä avoimella ohjauksella. Kun ilmalihakseen painetta kasvatetaan, se supistuu ja sen myötä liikuttaa alustaa. Halutun paikan ja asennon saavuttamiseksi tarvittavat lihasten pituudet ja kuormat lasketaan käänteisellä kinematiikkamallilla. Liikealustalla on siis kuusi vapausastetta, kolme siirtymisen ja kolme pyörimisen suhteen. Liikealustan rakennetta kutsutaan Stewart-tyyppiseksi sen artikkelissaan ”A platform with six degrees of freedom” [73] vuonna 1966 esitelleen D. Stewartin mukaan.

Liikealustaan on kiinnitetty aito kaivostyökoneen istuin. Istuimen käsinojissa ovat ohjainsauvat. Kone on runko-ohjattava. Vasemmalla sauvalla kuljettaja valitsee ajosuunnan ja vaihteen sekä ohjaa koneen rungon asentoa eli ajosuuntaa. Oikeanpuoleisella sauvalla ohjataan puomia ja kauhaa. Kuljettajan eteen liikealustalle on kiinnitetty kaasusäiliö ja jarrupolkimet.

Simuloitava työkone on siis kuvassa 4.1 näkyvä kuormaaaja. Kuvassa 4.3 on näkymä simulaattorista. Kuljettaja istuu koneen ohjaamossa sivuttain. Eteenpäin eli kauhan suuntaan ajettaessa ajajan pitää siis katsoa vasemmalle ja peruutettaessa oikealle. Ahtaan hytin ja hankalan ajoasennon lisäksi ajamista vaikeuttaa huono näkyvyys etenkin eteenpäin ajettaessa, jolloin koneen kauha tietyissä asennoissa peittää näkyvyyden ikkunasta lähes kokonaan.

Koneen dynaaminen simulointimalli on Mevean toimittama. Samaa mallia on aikaisemmin käytetty Yousefin ja muiden käytettävyydestutkimuksessa [83], jossa tutkittiin simulaattorin käytettävyyttä lastaustehtävässä kahdella eri kauhatyypillä. Tuossa tutkimuksessa ei hyödynnetty immersiiivistä virtuaaliympäristöä, vaan näkymät eteen ja sivuille tuotettiin kolmella työpöytänäytöllä, paikannusta ei käytetty ja istuimena oli tavallinen toimistotuoli.

Kuormaaajan ohjauspaneeli simulaattorissa on virtuaalinen. Paneelissa on näyttö, joka antaa kuljettajalle tietoa koneen tilasta: näytöllä esitetään vallitseva ajosuunta, päällä oleva vaihde sekä moottorin kierrosluku.

Kuormaaajan moottorin ääni on simulaattorissa äänimaailman hallitseva elementti. Koska moottorin ääni oikeassa koneessa korreloi kierrosluvun kanssa, vaikuttaa ääni kuljettajan havaitsemaan ajonopeuteen. Kwonin ja muiden tutkimuksessa [34] todettiin, että moottorin äänen kuuleminen sai ajajan kokemaan ajonopeuden tarkemmin todellista vastaavaksi kuin ilman ääntä. Toisaalta, jos visuaalinen ja ääni-informaatio poikkesivat toisistaan, kuvalla oli ratkaiseva merkitys nopeushavaintoon. Tällä perusteella voidaan todeta, että vaikka simulaattorissa moottorin ääntä ei ole sidottu kierroslukuun realistisesti (esimerkiksi oikean moottorin ääntä nauhoittamalla), kuva- ja ääni-informaation mahdollisella ristiriitaisuudella ei ole suurta merkitystä kuljettajan kokemukselle simulaation realistisuudesta, vaan visuaalisen informaation tuottama havainto ajonopeudesta on riittävän tarkka.

## 4.2 Käyttäjäkokeet

Käyttäjäkokeiden tarkoituksena oli siis tutkia virtuaaliympäristön immersiotason vaikutusta kuormaaajasimulaattorin käyttäjän kokemaan läsnäolon tunteeseen ja suoritustasoon. Koska käyttäjän kokeneisuus ja teknologian tuttuus vaikuttavat syntyvään läsnäolon tunteeseen [36, 39], testiryhmään haluttiin saada henkilöitä, joilla olisi eri määrä kokemusta koskien tiettyjä simulaattoriin liittyviä tekijöitä. Ensimmäiseksi tarkasteltavaksi tekijäksi valittiin koneella suoritettavaa työtehtävää koskeva osaaminen eli kokemus raskaiden työkoneiden ajamisesta. Toiseksi merkitseväksi tekijäksi päätettiin ottaa simulaattoriin liittyvä teknologinen osaaminen eli kokemus tietokoneilla tai pelikonsoleilla pelattavista ajopeleistä ja simulaattoreista. Alsina-Jurnetin ja Gutiérrez-Maldonadon [1] tutkimuksessa kokemukselle kolmiulotteisista peleistä ja tietokoneista sekä koetulle läsnäolon tunteelle ei löytynyt yhteyttä. Heidän tutkimuksessaan virtuaaliympäristöinä olivat kuitenkin erilaiset tilat (huoneistot, metro, luokkahuone) eikä koehenkilöiden tehtäviin liittynyt mitään pelinkaltaisia toimintoja kuten simulaattorilla ajamista.

Tähän tutkimukseen läsnäolon mittaamisen menetelmäksi valittiin kyselylomake, johon poimittiin PQ-lomakkeesta sopivat kysymykset. Slater [65] on kritisoinut PQ-lomaketta siitä, että se ei niinkään mittaa läsnäolon kokemusta itsessään vaan



käyttäjien subjektiivisia arvioita läsnäolon tunteeseen vaikuttavista tekijöistä. Tässä tutkimuksessa kuitenkin on tarkoitus tutkia juuri sitä, missä määrin käyttäjät kokevat virtuaalisovelluksen eri osa-alueet realistisiksi. Siksi PQ-lomakkeen kysymykset ovat hyvä lähtökohta. Kuten Singer ja Witmer vastineessaan Slaterille toteavat, on selvää, että läsnäolon kokeminen on subjektiivinen tila ja subjektiivisen informaation kautta saadaan tietoa läsnäolorakenteesta [63]. Läsnäolon tunteen tutkimuksessa (esimerkiksi Schubert ja muut [57]) on käyty paljon keskustelua siitä, missä määrin erilaisten lomakkeiden kysymykset liittyvät subjektiivisen läsnäolon kokemuksen mittaamiseen, immersiiivisen teknologian arviointiin tai vuorovaikutuksen arviointiin. Tämä keskustelu jää kuitenkin tämän tutkimuksen tutkimusalueen ulkopuolelle.

Lomakkeiden käytön etuina ovat mittaustavan standardisointi, luotettavuus, testijärjestelyn suoraviivaisuus ja pisteytyksen helppous [63]. Usoh ja muut ovat esittäneet, että läsnäololomakkeita ei pitäisi käyttää kokonaan erityyppisten ympäristöjen vertailuun kuten keinotodellisuuden ja reaalimaailman vertaamiseen tai immersiiivisen virtuaaliympäristön ja työpöytäympäristön vertaamiseen [76]. Tämä johtuu siitä, että vastaajat muodostavat kysymyksien merkityksistä kyseiseen ympäristöön sopivan mielikuvan ja siksi eri ympäristöjä koskevat vastaukset eivät ole vertailukelpoisia. Tässä tutkimuksessa pysytään koko ajan samassa virtuaaliympäristössä, joten tällaista ongelmaa ei ole.

#### 4.2.1 Testiryhmä

Testiryhmä koostui yhteensä 25 miespuolisesta henkilöstä, joista yliopisto-opiskelijoita oli 13, ammattiopisto-opiskelijoita 3, työkonekuljettajiksi ammatillisessa täydennyskoulutuksessa opiskelevia 4 sekä heidän opettajiaan 5 kappaletta. Ryhmän ikähaarukka oli 17–59 vuotta ja keskimääräinen ikä 30 vuotta. Kaikkien näkökyky oli normaali.

Testihenkilöiltä kysyttiin aluksi lomakkeella kaksi kysymystä, joiden perusteella heidät ryhmiteltiin. Ensimmäinen kysymys oli *Miten usein käytät tai olet käyttänyt isompia ajettavia työkoneita (esim. maataloustraktori, kaivuri, metsäkone)?* ja toinen *Miten usein käytät tai olet käyttänyt simulaatiopelejä (esim. lentokoneen, laivan, avaruusaluksen ajamista simuloivat pelit) tai ajopelejä (esim. tehtävänä selviytyä tietyllä kulkuvälineellä määrätystä radasta)?*. Vastausvaihtoehtoina molemmissa olivat:

1 = en koskaan

2 = joskus kokeillut

3 = kerran kuukaudessa

4 = pari kertaa kuukaudessa

5 = kerran viikossa

6 = pari kertaa viikossa

7 = päivittäin tai lähes päivittäin.

Ryhmään *Kuljettajat* kuuluivat ne 15 henkilöä, jotka arvioivat työkonekokemuksensa numeroilla 3–7 (tosin kukaan ei valinnut vaihtoehtoa 3). Loput 10 henkilöä muodostivat ryhmän *Ei-kuljettajat* ja heidän arvionsa olivat joko 1 tai 2. Vastaavasti ryhmän *Pelaajat* muodostivat ne 15 henkilöä, joiden pelikokemus oli välillä 3–7, ja ryhmän *Ei-pelaajat* loput 10 henkilöä, joiden arviot osuivat vaihtoehtoihin 1 tai 2.

#### 4.2.2 Koejärjestely

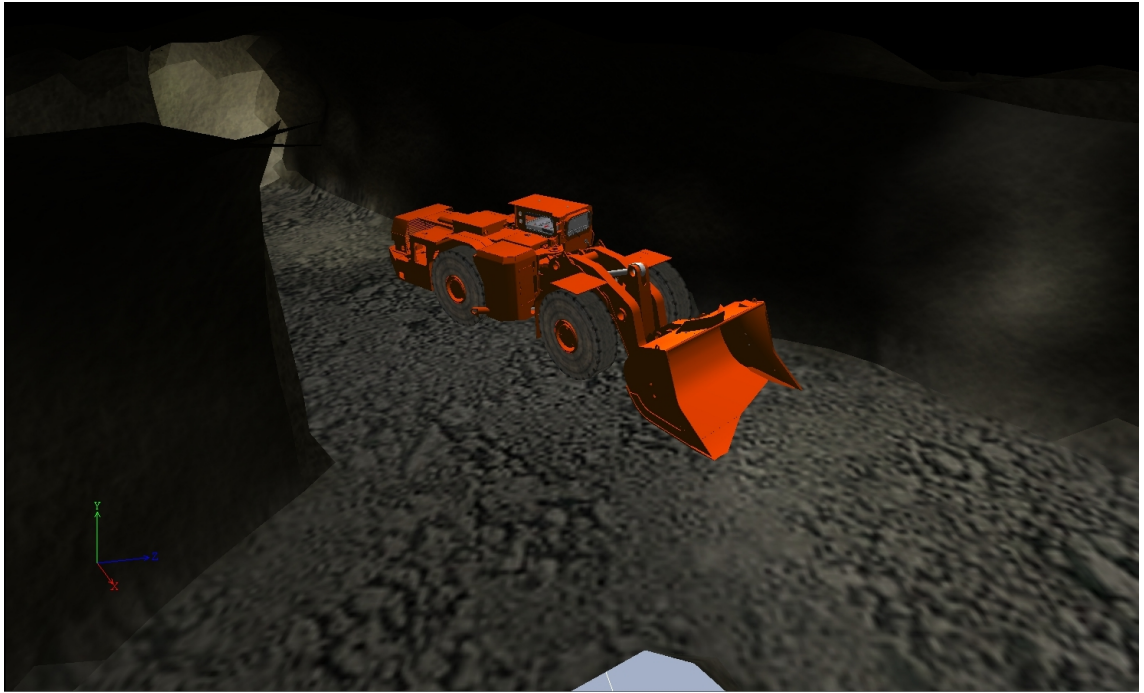
Käyttäjäkokeiden tavoitteena oli analysoida seuraavien immersiokomponenttien merkitystä käyttäjän kokemaan läsnäolon tunteeseen ja suoritustasoon: kolmiulotteinen visualisointi, pään paikannus ja liikealusta. Jotta testaukseen kuluva aika kunkin käyttäjän osalta pysyisi kohtuullisena, päätettiin, että jokainen suorittaa kaksi testiajoa. Testihenkilöt jaettiin sattumanvaraisesti kahteen ryhmään, joista ensimmäiseen tuli 12 osanottajaa ja toiseen 13. Simulaattorista määritettiin kolme immersiotasoltaan erilaista laitteistokokoonpanoa:

- Kokoonpanossa 1 käytössä oli normaali kaksiulotteinen kuva ilman pään paikannusta tai liikealustaa.
- Kokoonpanossa 2 käytettiin kolmiulotteista stereokuvaa sekä pään paikannusta.
- Kokoonpanossa 3 käytettiin kolmiulotteista stereokuvaa, pään paikannusta sekä liikealustaa.

Ensimmäisen testiryhmän tehtävänä oli ajaa kokoonpanoilla 1 ja 2. Toiselle ryhmälle annettiin puolestaan tehtäväksi testata kokoonpanoja 2 ja 3.

Käyttäjäkokeen rakenne oli seuraavanlainen:

1. Simulaattorin ja tehtävän esittely.
2. Ensimmäinen testiajo.
3. Läsnäolon tunnetta kartoittavaan kysymyslomakkeeseen vastaaminen.
4. Toinen testiajo.
5. Kysymyslomakkeeseen vastaaminen uudelleen.



Kuva 4.4: Virtuaalinen kuormaaja kaivoksessa.

Seuraavaksi käydään käyttäjätestien kulku tarkemmin lävitse.

Aluksi testihenkilöitä opastettiin simulaattorin hallintalaitteiden käyttöön. Vaikka suurimmalla osalla ryhmästä olikin kokemusta raskaiden työkoneneiden ajamisesta, oli kaivoskoneen sivuttainen ajotapa ja kahvoilla tapahtuva ohjaaminen kaikille ennalta outoa. Erityisesti kauhan oikea asento kivikasaan ajettaessa näytettiin ja selitettiin. Testaajille näytettiin myös kuva virtuaalisesta kuormaajasta kaivoksessa (kuva 4.4), jotta he saisivat paremman käsityksen koneen olemuksesta. Erityisesti puomin ja kauhan toiminnan hahmottaminen olisi hankalaa ilman visuaalista mielikuvaa kuormaajasta. Näkymä ohjaamosta ulos on niin rajallinen, että pelkästään sen perusteella olisi hyvin hankala hahmottaa koneen toimintaa. Esittelyn jälkeen testihenkilö sai ajaa vapaasti simulaattorilla, jotta saisi tuntumaa ohjaimista ja virtuaaliympäristöstä.

Itse ajotehtävä pysyi koko ajan samana: Kuljettajan tavoitteena oli ajaa kuormaaja kivikasaan, saada mahdollisimman paljon kiviä kauhaan, ajaa muutaman sadan metrin matka kaivoskäytäviä pitkin kauhantyhjennysalueelle ja pudottaa kivet kauhasta niille tarkoitettuun paikkaan. Kaivoskäytävät olivat varsin ahtaita, ja suoritettava ajotehtävä pakotti kuljettajan ajamaan sekä eteen- että taaksepäin ja tekemään muutaman terävän käännöksen. Lisäksi näkymä ohjaamosta ulos oli hyvin rajoitettu pienten ikkunoiden, suuren kauhan ja pimeään ympäristön vuoksi. Kaikki nämä tekijät tekivät virtuaalikuormaajan ajamisesta varsin haastavan tehtävän. Samat hankaluudet ovat kuitenkin läsnä oikeaa kaivoskonetta käytettäessä, ja ta-

voitteena olikin tehdä ajotehtävästä mahdollisimman realistinen.

Molempien ajotehtävien jälkeen testajat vastasivat kysymyslomakkeeseen, jolla mitattiin heidän kokemansa läsnäolon tunteen voimakkuutta. Lomakkeeseen poimittiin kysymyksiä PQ-lomakkeesta. Sen 32 kysymyksestä yhdeksän liittyi asioihin, jotka olivat olennaisia kokeessa käytetyn virtuaaliympäristön ja simulaattorin sekä ajotehtävän kannalta. Nämä yhdeksän kysymystä suomennettuina otettiin mukaan kysymyslomakkeeseen, joka on esitetty kuvassa 4.5. Viimeinen kysymys ei ole PQ-lomakkeesta. Se otettiin mukaan, koska oli kiinnostavaa nähdä, miten käyttäjän tuntemus kaivoksessa olemisesta korreloisi muihin läsnäolokysymyksiin. Kysymykset on muotoiltu siten, että kussakin kohdassa simulaattorin realistisuuden ja koetun läsnäolon tunteen kannalta huonoin vaihtoehto sijaitsi vasemmalla reunassa ja paras oikealla. Tulosten analysointia varten vastausten asteikko numeroitiin vasemmalta alkaen numeroilla 1–7. Tällä tavoin testihenkilöiden vastauksille saatiin numeeriset arvot.

Simulaattorin immersiotason vaikutusta testajien suoritustasoon tutkittiin mitaamalla seuraavia suureita:

1. kauhaan nostettujen kivien yhteispaino,
2. onnistuneesti perille vietyjen kivien yhteispaino sekä
3. kuormaaajan seinäntörmäyskertojen lukumäärä.

Kuormaaajan kauhan käyttäminen ei ole helppoa varsinkaan aloittelijalle. Jotta kauhaan saisi mahdollisimman paljon kiviä, pitää kivikasaan ajaa kohtuullisella nopeudella kauha oikeassa asennossa maata vasten. Siksi kauhaan nostettujen kivien määrä päätettiin ottaa yhdeksi suoritustason mittariksi. Toisaalta kiviä saattaa matkan aikana pudota kauhasta seinään törmäysten, epätasaisen ajon ja ohjainten puutteellisen hallinnan vuoksi. Sen vuoksi haluttiin myös mitata, kuinka paljon kiviä testihenkilö sai loppujen lopuksi vietyä perille. Koneen hankala hallittavuus sekä ahtaat ja pimeät kaivoskäytävät aiheuttavat sen, että törmäyksiä seiniin on vaikea välttää. Törmäykset haittaavat huomattavasti ajamista ja etenkin liikealustaa käytettäessä lisäävät ajamisen epämukavuutta. Tämän takia törmäysten lukumäärä ajon aikana katsottiin tarpeelliseksi suoritustason mittariksi.

Kun törmäyksiä tarkastellaan matemaattisesti visualisointiohjelmistolla, jokainen yksittäinen seinään törmäyminen luo kymmeniä tai satoja törmäysdatapisteitä. Analyysissä laskettiin samaan törmäyskertaan kuuluviksi peräkkäiset alle 0,5 sekunnin sisällä olevat törmäysdatapisteet. Koneen kauhan, etuosan ja takaosan kokemat törmäykset laskettiin yhteen.

**Vastaa seuraaviin kysymyksiin äskeisen ajotehtävän synnyttämien kokemustesi perusteella. Merkitse rasti ruutuun asteikolle kohdassa, joka kuvaa kokemustasi. Asteikon ääripäät ja keskikohta on kuvattu sanallisesti.**

1 Kuinka paljon pystyit hallitsemaan tapahtumia?	En ollenkaan	Kohtuullisesti	Täydellisesti
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2 Missä määrin virtuaaliympäristö reagoi tekemisiisi (silloin kun odotitkin jonkinlaista vastetta)?	Ei ollenkaan	Välillä reagoi, välillä ei	Aina
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3 Kuinka realistisen vaikutelman sait virtuaalitallassa liikkuvista kappaleista?	Täysin epärealistisen	Kohtuullisen realistisen	Täysin realistisen
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4 Kuinka ristiriitaista oli eri aistien kautta tullut informaatio?	Todella ristiriitaista	Melko ristiriitaista	Ei ollenkaan ristiriitaista
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5 Missä määrin virtuaaliympäristössä kokemasi asiat olivat yhdenmukaisia todellisen maailman kanssa?	Ei ollenkaan	Jossain määrin	Täydellisesti
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6 Kuinka perusteellisesti pystyit aktiivisesti tutkimaan tai tarkastelemaan ympäristöä katselemalla?	En ollenkaan	Jossain määrin	Täysin
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7 Kuinka paljon viivettä koit tekojesi ja niiden seurausten välillä?	Todella paljon	Jonkin verran	En yhtään
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8 Kuinka nopeasti sopeuduit virtuaaliympäristöön?	En sopeutunut ollenkaan	Jonkin ajan kuluttua	Sopeuduin heti
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9 Kuinka paljon kuvanlaatu häiritsi sinua tai vaikeutti pyydetyn tehtävän suoritusta?	Todella paljon	Jonkin verran	Ei ollenkaan
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10 Missä määrin tunsit olevasi kaivoksessa?	En ollenkaan	Jossain määrin	Täysin
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Kuva 4.5: Koetun läsnäolon tunteen evaluointiin kunkin testiajon jälkeen käytetty kysymyslomake.

Taulukko 4.1: Läsnaöloa mittaavien kymmenen kysymyksen vastaukset keskiarvoistettuina testiryhmien ja simulaattorikokoonpanojen (KP) mukaisesti.

Asteikko: 1 = vähäisin...7 = suurin läsnäolo

Kysymys	Testiryhmä 1		Testiryhmä 2	
	KP 1	KP 2	KP 2	KP 3
1 (tapahtumien hallinta)	4.2	4.4	4.3	4.8
2 (odotettu vaste)	4.7	4.8	4.9	5.8
3 (liikkuvat kappaleet)	3.9	4.0	4.8	5.3
4 (aistipalaute)	4.8	4.6	5.2	5.7
5 (todellisuuttavastaavuus)	4.1	4.4	4.7	5.5
6 (visuaalinen tarkastelu)	4.3	4.8	4.5	4.8
7 (koettu viive)	5.2	5.4	5.9	6.2
8 (sopeutumisen nopeus)	4.3	4.8	4.4	5.5
9 (kuvanlaadun vaikutus)	4.8	5.0	4.7	5.5
10 (kaivoksessa olemisen tunne)	3.8	4.1	4.9	4.9
Keskiarvo	4.4	4.6	4.8	5.4

### 4.2.3 Tulokset

Sekä kysymyslomakkeilla saatuja vastauksia että suorituksista mitattuja tuloksia analysoitiin laskemalla kysymys- ja suurekohtaisia keskiarvoja kullekin testiryhmälle ja simulaattorikokoonpanolle. Samalla tavalla ryhmäkeskiarvoja käytettiin tutkittaessa mahdollisia eroja ryhmien Kuljettajat ja Ei-kuljettajat sekä Pelaajat ja Ei-pelaajat välillä. Tulosten tilastollinen merkitsevyys varmistettiin Matlabin ANOVA-varianssianalyysifunktioilla.

#### Läsnaölo

Keskiarvot läsnäololomakkeen (kuva 4.5) vastauksista ryhmiteltyinä testiryhmien ja simulaattorikokoonpanojen mukaisesti on esitetty taulukossa 4.1. Tuloksista nähdään, että kokoonpanojen 1 ja 2 välinen muutos kaksiulotteisesta kuvasta kolmiulotteiseen kuvaan ja pään paikannukseen ei vaikuttanut oleellisesti syntyneeseen läsnäolon tunteeseen. Vaikka ensimmäisen testiryhmän arviot näyttävät toisen testiajon jälkeen keskimäärin nousseen hieman kaikkien muiden paitsi neljännen kysymyksen kodalla, eivät erot ole tilastollisesti merkitseviä. Sen sijaan liikealustan aktivoimisen vaikutus näkyy selvästi toisen testiryhmän vastauksissa. Taulukon alimmalla rivillä ovat kaikkien kysymysten keskiarvot. Testiryhmän 2 kokoonpanon 3 keskiarvo on selkeästi suurempi kuin kummankaan testiryhmän kokoonpanolla 2. Tarkastellaan ensin, mitkä kysymykset olivat olennaisimpia eron muodostumisessa testiryhmän 2 kokoonpanojen välillä. Havaitaan, että tilastollisesti merkitsevä nousu tapahtui kysymysten 2 (odotettu vaste), 5 (todellisuuttavastaavuus) ja 8 (sopeutumisen nopeus)

Taulukko 4.2: Varianssianalyysin tuloksia testiryhmän 2 osalta. KA = keskiarvo,  $\sigma$  = keskihajonta.

Kysymys	KP 2		KP 3		$F$ -tunnusluku	$p$ -arvo
	KA	$\sigma$	KA	$\sigma$		
2	4,9	1,2	5,8	0,8	5,4	$p < 0,03$
5	4,7	1,0	5,5	0,8	4,6	$p < 0,04$
8	4,4	1,3	5,5	1,1	5,6	$p < 0,03$

Taulukko 4.3: Varianssianalyysin tuloksia testiryhmien jälkimmäisten testiajojen osalta. KA = keskiarvo,  $\sigma$  = keskihajonta.

Kysymys	Testiryhmä 1, KP 2		Testiryhmä 2, KP 3		$F$ -tunnusluku	$p$ -arvo
	KA	$\sigma$	KA	$\sigma$		
3	4,0	1,7	5,3	1,1	5,5	$p < 0,03$
4	4,6	1,4	5,7	1,0	5,0	$p < 0,04$
5	4,4	1,3	5,5	0,8	6,0	$p < 0,02$

kohdalla (taulukko 4.2). Vastaavasti verrattaessa testiryhmän 2 kokoonpanoa 3 ja testiryhmän 1 kokoonpanoa 2 (taulukko 4.3) havaitaan tilastollisesti merkitsevät erot kysymyksissä 3 (liikkuvat kappaleet), 4 (aistipalaute) ja 5 (todellisuuttavastavuus). Koska kokoonpanojen 2 ja 3 erona oli liikealustan käyttö, voidaan todeta, että liikealusta vaikutti erityisesti lisäämällä virtuaalimaailman tapahtumien realistisuutta. Koska molempien testiryhmien kokoonpanolla 2 antamissa tuloksissa ei ole keskinäistä merkittävää eroa, näyttää siltä, että kokoonpanojen järjestyksellä kokeessa ei ollut havaittavaa vaikutusta arvioihin.

Seuraavaksi tarkastellaan, miten kokemus raskaiden työkonoiden ajamisesta vaikuttaa virtuaaliympäristön synnyttämään läsnäolon tunteeseen. Taulukossa 4.4 on esitetty ryhmien Kuljettajat ja Ei-kuljettajat vastauksien keskiarvot kunkin kysymyksen kohdalla. Alimmalla rivillä ovat jälleen kokonaiskeskiarvot. Nähdään, että ryhmän Kuljettajat arviot ovat keskimäärin selvästi alhaisempia kuin toisen ryhmän. Tilastollisesti merkitsevät erot löytyvät kysymyksistä 3 (liikkuvat kappaleet, 4 (aistipalaute) ja 7 (koettu viive) (taulukko 4.5). Lisäksi hyvin lähellä tilastollisesti merkitseviä eroja ollaan kysymyksissä 2 (odotettu vaste,  $p < 0,067$ ) ja 5 (todellisuuttavastavuus,  $p < 0,055$ ).

Pelikokemuksella sen sijaan ei näyttäisi olevan vaikutusta siihen, miten voimakkaan läsnäolon tunteen simulaattorin käyttäjä kokee. Taulukossa 4.6 näkyvät läsnäoloa mittaavien kysymysten tulokset ryhmien Pelaajat ja Ei-pelaajat mukaisesti. Yksikään eroista ei ole tilastollisesti merkitsevä. Myöskään näiden ryhmien tulosten tarkastelu kokoonpanokohtaisesti ei paljastanut merkitseviä eroja minkään yksittäisen kysymyksen kohdalla.

Taulukko 4.4: Läsnaöloa mittaavien kymmenen kysymyksen vastaukset keskiarvoistettuina ryhmien Kuljettajat ja Ei-kuljettajat mukaisesti. Mukana kummankin testiryhmän molemmat kokoonpanot.

Kysymys		Kuljettajat	Ei-kuljettajat
1	(tapahtumien hallinta)	4,5	4,4
2	(odotettu vaste)	4,7	5,6
3	(liikkuvat kappaleet)	4,2	5,1
4	(aistipalaute)	4,8	5,6
5	(todellisuuttavastaavuus)	4,4	5,1
6	(visuaalinen tarkastelu)	4,5	4,8
7	(koettu viive)	5,2	6,4
8	(sopeutumisen nopeus)	4,5	5,2
9	(kuvanlaadun vaikutus)	4,8	5,4
10	(kaivoksessa olemisen tunne)	4,5	4,4
Keskiarvo		4,6	5,2

Taulukko 4.5: Varianssianalyysin tuloksia ryhmien Kuljettajat ja Ei-kuljettajat osalta. KA = keskiarvo,  $\sigma$  = keskihajonta.

Kysymys	Kuljettajat		Ei-kuljettajat		$F$ -tunnusluku	$p$ -arvo
	KA	$\sigma$	KA	$\sigma$		
3	4,2	1,6	5,1	1,2	4,3	$p < 0,05$
4	4,8	1,3	5,6	1,0	4,8	$p < 0,03$
7	5,2	1,4	6,4	0,7	13,0	$p < 0,001$

Taulukko 4.6: Läsnaöloa mittaavien kymmenen kysymyksen vastaukset keskiarvoistettuina ryhmien Pelaajat ja Ei-pelaajat mukaisesti. Mukana kummankin testiryhmän molemmat kokoonpanot.

Kysymys		Pelaajat	Ei-pelaajat
1	(tapahtumien hallinta)	4,4	4,5
2	(odotettu vaste)	5,0	5,2
3	(liikkuvat kappaleet)	4,5	4,5
4	(aistipalaute)	5,2	4,9
5	(todellisuuttavastaavuus)	4,7	4,7
6	(visuaalinen tarkastelu)	4,6	4,7
7	(koettu viive)	5,9	5,4
8	(sopeutumisen nopeus)	4,9	4,5
9	(kuvanlaadun vaikutus)	5,3	4,5
10	(kaivoksessa olemisen tunne)	4,4	4,6
Keskiarvo		4,9	4,7



Taulukko 4.7: Suoritusastoa kuvaavat tulokset testiryhmittäin (TR) ja kokoonpanoittain (KP).

TR	KP	Nostetut kivet (kg)	Kuljetetut kivet (kg)	Törmäykset
1	1	3900	3650	1,1
1	2	3820	3540	7,1
2	2	2620	2500	9,4
2	3	3380	2410	10,7

Taulukko 4.8: Varianssianalyysin tulokset törmäyksien osalta. Vertailu testiryhmän (TR) 1 kokoonpanoon (KP) 1. KA = keskiarvo,  $\sigma$  = keskihajonta.

TR	KP	KA	$\sigma$	$F$ -tunnusluku	$p$ -arvo
1	1	1,1	1,5	—	—
1	2	7,1	4,3	15,6	$p < 0,002$
2	2	9,4	8,6	8,1	$p < 0,01$
2	3	10,7	12,3	5,38	$p < 0,03$

### Suoritusasto

Teknisen ongelman vuoksi viiden testiaajan kohdalla suoritusastoa mittaavaa dataa ei tallentunut jommankumman testiajon aikana. Tämän vuoksi näissä tuloksissa ovat mukana vain 20 testihenkilön suoritukset. Taulukossa 4.7 on esitetty testiajoista mitatut suureet testiryhmittäin ja kokoonpanoittain. Erot nostettujen ja kuljetettujen kivien määrissä eivät ole tilastollisesti merkitseviä. Sen sijaan törmäyksistä havaitaan, että testiryhmän 1 ajaessa kokoonpanolla 1 niitä tuli selvästi vähiten (varianssianalyysi taulukossa 4.8). Tulos tarkoittaa, että ajaminen kaksiulotteisella näytöllä ilman pään paikannusta tai liikealustaa oli helpointa siinä mielessä, että törmäyksiä seiniin tuli vähiten.

Kokeneiden ja kokemattomien kuljettajien tuloksia on vertailtu taulukossa 4.9. Huomataan, että kokeneet kuljettajat ovat onnistuneet paremmin: Tilastollisesti

Taulukko 4.9: Suoritusastoa kuvaavat tulokset ryhmien Kuljettajat ja Ei-kuljettajat mukaisesti sekä varianssianalyysin tulokset kivien määrän osalta. KA = keskiarvo,  $\sigma$  = keskihajonta.

Ryhmä	Nostetut kivet (kg)		Kuljetetut kivet (kg)		Törmäykset
	KA	$\sigma$	KA	$\sigma$	
Kuljettajat	4020	2310	3690	2140	6,9
Ei-kuljettajat	2610	1940	2090	2180	7,9
	$F$ -tunnusluku	$p$ -arvo	$F$ -tunnusluku	$p$ -arvo	
	4,2	$p < 0,05$	5,5	$p < 0,03$	

Taulukko 4.10: Ryhmien Kuljettajat ja Ei-kuljettajat tulokset kokoonpanolla 3 kivien määrän osalta sekä varianssianalyysin tulokset. KA = keskiarvo,  $\sigma$  = keskihajonta.

Ryhmä	Nostetut kivet (kg)		Kuljetetut kivet (kg)	
	KA	$\sigma$	KA	$\sigma$
Kuljettajat	5020	2850	4350	2510
Ei-kuljettajat	2010	1490	800	1500
	<i>F</i> -tunnusluku	<i>p</i> -arvo	<i>F</i> -tunnusluku	<i>p</i> -arvo
	5,1	$p < 0,05$	8,5	$p < 0,02$

merkitsevät erot havaitaan nostettujen ja kuljetettujen kivien määrissä. Sen sijaan törmäyksissä ero on merkityksetön. Seuraavaksi haluttiin tutkia, millä simulaattorikokoonpanolla erot kokeneiden ja kokemattomien kuljettajien välillä syntyvät. Selvisi, että merkittävin vaikutus on kokoonpanolla 3, jossa toimittiin liikealustan kanssa. Taulukossa 4.10 on esitetty ryhmien Kuljettajat ja Ei-kuljettajat tulokset liikealustaa käytettäessä. Sekä nostettujen että kuljetettujen kivien määrässä kokeneiden kuljettajien tulokset ovat parempia kuin kokemattomien.

## 5. YHTEENVETO

Perusoletuksena oli, että immersioikomponenttien lisääminen virtuaaliympäristöön lisäisi testihenkilöiden kokemaa läsnäolon tunnetta. Kuitenkaan kaksikulotteisen näytön vaihtaminen kolmiulotteiseen stereonäyttöön sekä pään paikannuksen käyttöön otto eivät vaikuttaneet odotetulla tavalla: muutosta raportoiduissa läsnäolon tunnetta mittaavissa tekijöissä ei tapahtunut. Oletettavasti tämä saattaa johtua siitä, että kolmiulotteisen kuvan laatu ei ollut riittävä. Se ei saanut virtuaaliympäristöä tuntumaan siinä määrin realistiselta, että käyttäjät olisivat kokeneet voimakkaammin olevansa uppoutuneet virtuaalimaailmaan. Lisäksi koska ajaja kuitenkin istuu koko ajan istuimella, ei pään paikannuksella ollut niin suurta merkitystä näkökulman kannalta. Toisaalta kyse voi olla vain siitäkin, että simulaattori oli suurten näyttöpintojen ja aitojen ohjainten ansiosta varsin immersiiivinen ilman stereoskopiaa ja paikannustakin. Kolmiulotteisuus ei vain tuonut niin paljoa lisää immersiiivisyyttä, että käyttäjän kokemaa läsnäolon tunnetta olisi sen myötä merkittävästi kasvanut. Raportoidut läsnäolon tunnetta mittaavat arvot olivat enimmäkseen selkeästi asteikon keskiarvon yläpuolella jo kaksikulotteisessakin tapauksessa. Myös kaivoskäytävien pimeydellä ja pintojen tummilla sävyillä voi olla vaikutusta. Esimerkiksi Huangin ja Gaun [26] tutkimuksessa, jossa testattiin nostokurkisimulaattoria, huomattiin, että puuttuva kolmiulotteisuus oli käyttäjien mielestä hyvin häiritsevä tekijä. Nostokurjen käytön kannaltahan on hyvin olennaista erottaa syvyys suunnassa, missä kohdassa vaijerin päässä oleva kuorma liikkuu. Lisäksi näkymä oli huomattavasti valoisampi kuin kaivoksessa. Joka tapauksessa on aktiivistereoprojektioon perustuvan virtuaaliympäristön soveltamisen kannalta rohkaisevaa, ettei suljinlasien käyttäminen myöskään näyttänyt hankaloittavan testihenkilöiden toimintaa eikä laseja koettu häiritsevinä.

Yksi tutkimuskohde tulevaisuutta varten olisi, miten esimerkiksi kuvan resoluution tai tekstuurien realistisuuden parantaminen vaikuttaa koettuun läsnäolon tunteeseen. Vinayagamoorthyn ja muiden tutkimuksessa [77] tarkasteltiin tekstuurien laadun ja virtuaalisten ihmishahmojen realistisuuden vaikutusta läsnäoloon kokeessa, jossa koehenkilöt kulkivat virtuaalisen kaupungin kadulla. Kummallakin muuttujalla oli kaksi tasoa. Hieman yllättäen alhaisin läsnäolon taso koettiin silloin, kun ihmishahmot olivat realistisemmalla tasolla ja rakennusten tekstuuri vähemmän vaihtelua sisältävällä tasolla. Tämä johtui ilmeisesti siitä, että ”liian” realistinen ihmis-

hahmo suhteessa keinotekoisien näköiseen maisemaan tekee kokemuksesta vähemmän todentuntuisen kuin jos samassa maisemassa on selkeämmin keinotekoisia näköisiä hahmoja. Oleellista siis lienee, että virtuaalisen näkymän eri osat on kuvattu samalla realistisuuden tasolla. Simulaattorin kohdalla tämä voisi tarkoittaa sitä, että kannattaa panostaa yhtä lailla itse koneen kuin sen ympäristön visualisoinnin realismiin.

Liikealustan mukaan ottaminen simulaattoriin tuotti odotetun vaikutuksen: testihenkilöiden arviot läsnäoloa mittaavista tekijöistä olivat selkeästi korkeammat liikealustan kanssa kuin ilman sitä. Liikealustan vaikutus näkyi erityisesti siinä, että se sai testiajien mielestä virtuaaliympäristön reagoimaan odotetusti käyttäjän toimintaan, mikä on luonnollista. Esimerkiksi seinään törmäily liikealustan ollessa aktiivinen aiheuttaa sen, että käyttäjä todella tuntee törmäyksen vaikutuksen, kun penkki heilahtaa. Kuten Cavazzan ja muiden tutkimuksessa [9] osoitettiin, kausaalisen syy-seuraussuhteen havaitseminen tuottaa voimakkaamman läsnäolon tunteen virtuaaliympäristössä kuin odotetun seurauksen puuttuminen tai epärealistisen seurauksen havaitseminen. Liikealusta sai myös käyttäjät kokemaan, että virtuaaliympäristön tapahtumat olivat yhdenmukaisempia todellisen maailman tapahtumien kanssa. Tämäkin on helppo ymmärtää. Vaikka testihenkilöillä ei ollutkaan aikaisempaa kokemusta oikean kuormaaajan ajamisesta kaivoksessa, kaikki varmaan tiesivät, miltä esimerkiksi kuoppainen tie tuntuu autolla ajettaessa. Myös virtuaalisessa kaivoksessa oli epätasaisuuksia ajoreitillä, ja liikealustan vaikutus kuoppien aiheuttaman värinän välittämisessä ajajan istuimeen oli selvästi havaittavissa. Testihenkilöt myös sopeutuivat virtuaaliympäristöön nopeammin liikealustan kanssa. Jonkin verran tähän tietenkin vaikutti myös se, että liikealusta aktivoitiin toisella ajokerralla, jolloin kuljettajalla oli jo kokemusta ensimmäisestä testiajosta ja virtuaaliympäristöön sopeutumisesta sen aikana. Tulos kertoo kuitenkin myös siitä, että liikealusta ei lisännyt simulaattorin epämukavuutta siinä määrin, että sopeutuminen olisi ollut vaikeampaa. Kokemattomalle ajajalle voi kuitenkin tulla yllätyksenä, miten kovasti istuin heiluu ajon aikana. Heti testiajon alussa kivikasaan ajettaessa liikealustan vaikutus tuli varmasti esiin.

On tietenkin oleellista pohtia, mikä on oppimisen ja lisääntyvän kokemuksen vaikutus testiajien arvioihin läsnäoloa mittaavista tekijöistä. Ainakaan ensimmäisellä testiryhmällä mitään huomattavaa vaikutusta ei ollut, koska arviot ajojen jälkeen pysyivät samankaltaisina. Toisella testiryhmällä arviot olivat toisen ajon jälkeen korkeammat, mutta johtuiko tämä pelkästään liikealustasta? Tätä asiaa voidaan tutkia vertaamalla testiryhmien tuloksia toisiinsa. Ensimmäisessä testiajossa testiryhmällä 1 oli käytössä simulaattorikokoonpano 1 ja toisella testiryhmällä kokoonpano 2. Näiden ajojen jälkeen raportoiduissa läsnäolon tunnetta mittaavissa tekijöissä ei havaittu merkitseviä eroja. Sen sijaan kokoonpanoilla 2 ja 3 suoritettujen toisten

testiajojen jälkeen testiryhmän 2 arviot olivat selvästi nousseet korkeammiksi. Lisäksi testiryhmien 1 ja 2 tulokset kokoonpanolla 2 suoritettujen ajojen jälkeen olivat samankaltaisia, vaikka ne olivat eri ajokerroilta. Ottaen huomioon kaikki nämä tekijät voidaan todeta, että oppimisella tai kokemuksen karttumisella ei ollut havaittavaa merkitystä testiryhmän 2 tuloksiin vaan vaikuttava tekijä oli nimenomaan liikealustan aktivoiminen.

Mielenkiintoisia olivat myös tulokset ryhmien Kuljettajat ja Ei-kuljettajat osalta. Kuljettajien arviot läsnäolon tunnetta mittaavista tekijöistä olivat alhaisemmat. Näyttäisi siis siltä, että kokemus oikeiden työkoneiden ajamisesta korostaa eroja, joita simulaattorin ja aidon koneen välillä on, ja läsnäolon tunne jää siksi vaisummaksi. Oikeaa kuormajaa aiemmin käyttänyt henkilö huomaa helposti, että virtuaaliset kivenlohkareet eivät käyttäydy aivan samalla tavalla kuin oikeat. Siksi virtuaalitallassa liikkuvat kappaleet eivät tunnu niin realistisilta. Vastaavasti simulaattorin antama aistipalaute voi tuntua ristiriitaisemmalta sellaisen kuljettajan mielestä, jolla on kokemusta oikean työkoneen ajamisesta. Samalla tavoin voidaan selittää, miksi ryhmä Kuljettajat koki enemmän viivettä tekojen ja niiden seurausten välillä, arvioi virtuaaliympäristön reagoivan vähemmän odotetusti ja piti virtuaalimaailman tapahtumia vähemmän yhtenevinä todellisen maailman tapahtumien kanssa. Nämä tulokset alleviivaavat sitä, että suunniteltaessa ja kehitettäessä simulaattoria on ensiarvoisen tärkeää ottaa jo kehitystyön varhaisessa vaiheessa mukaan kokeneita koneenkuljettajia, joiden antaman palautteen myötä simulaattorin kehitystä voidaan ohjata oikeaan suuntaan.

Kokemuksella ajopelien ja -simulaattoreiden pelaamisesta ei näyttänyt olevan vaikutusta testihenkilölle syntyneeseen läsnäolon tunteeseen. On siis syytä olettaa, että simulaattori ei niinkään muistuttanut tietokone- tai videopeliä kuin oikeaa konetta.

Tutkimuksen tulokset osoittavat, että immersioikomponenttien merkitys läsnäolon tunteen syntymiselle vaihtelee komponentista riippuen. Kolmiulotteinen näkymä ja pään paikannus eivät tuoneet merkittävää lisäystä läsnäolon tunteeseen verrattuna kaksiulotteiseen näkymään, vaikka niiden avulla virtuaaliympäristö on ilman muuta immersiivisempi. Sen sijaan liikealustalla oli selvä vaikutus. Jos puutteet kolmiulotteisen grafiikan laadussa olivat syynä siihen, etteivät käyttäjät kokeneet uppoutuvansa ympäristöön enemmän kuin kokoonpanolla 1, liikealustan käyttöönotto tietyllä tavalla antoi nuo puutteet anteeksi.

Tätä tulosta on mielenkiintoista verrata muualla raportoituihin tutkimuksiin immersioikomponenttien ja läsnäolon tunteen suhteesta. Shim ja Kim [61] tutkivat virtuaalisen akvaarion synnyttämää läsnäolon tunnetta muuttujina kalojen liikkeiden realismi ja näkökentän laajuus. Ajatuksena oli lähestyä asiaa kustannustehokkuuden näkökulmasta ja määritellä järjestelmäresurssien minimimäärä, jolla saavutettaisiin haluttu läsnäolotaso. Tulokset osoittivat, että näkökentän laajuus on

mainitusta kahdesta tekijästä merkittävämpi: 180 asteen näkökenttä ja vähemmän realistiset kalojen liikkeet loivat suuremman läsnäolon tunteen kuin 120 asteen näkökenttä ja realistisemmat kalojen liikkeet. Vastaavasti tässä työssä esitetyssä tutkimuksessa simulaattorin liikkeiden tunteminen oli ratkaisevaa käyttäjien kannalta. Tällä perusteella voidaan todeta, että työkonesimulaattorin realistiset liikkeet luovat vahvan läsnäolon tunteen. Kun siis simulaattorin kehittämiseen on käytettävissä rajalliset resurssit, on liikealustan hankkiminen kannattava lähtökohta.

Tarkasteltaessa testihenkilöiden suoritusten mittareita esille tuli muutamia merkillepantavia seikkoja. Ensinnäkin vertailtaessa eri kokoonpanoja havaittiin, että pelkällä kaksiulotteisella näytöllä ajaminen oli helpointa siinä mielessä, että törmäyksiä seiniin tuli kokoonpanolla 1 vähiten. Olisi ennalta olettanut, että kolmiulotteinen näkymä ja pään paikannus olisivat helpottaneet kaivoskäytävän ja koneen ulottuvuuksien hahmottamista siten, että seiniin törmäminen ei ainakaan olisi lisääntynyt. Nyt niin kuitenkin kävi. Ilmiön syytä ei tämän tutkimuksen perusteella voida varmasti sanoa. Joka tapauksessa kuormaaajan ajaminen ahtaassa ja pimeässä kaivoskäytävässä on haastavaa varsinkin henkilölle, jolla ei ole siitä aiempaa kokemusta. Siksi ei ole yllätys, että törmäyksiä seiniin tapahtuu simulaattorissakin kolmiulotteista grafiikkaa käytettäessä. Ehkä grafiikan kaksiulotteisuus jollakin tapaa hyödytti testikuljettajaa luomalla tietyllä tavalla helpommin hallittavan karkeamman tason yleistyksen ympäristöstä. Joka tapauksessahan ihminen luo mielessään jonkinlaisen mentaalisen kolmiulotteisen vaikutelman virtuaaliympäristöstä, koska siinä voi liikkua kolmessa ulottuvuudessa. Voi olla, että käytetyn kolmiulotteisen grafiikan laatu ei ollut riittävän hyvä, jotta se tuonut oleellista parannusta testaajan käsitykseen virtuaalimaailmasta. Tämän asian tarkempi analysointi vaatisi lisätutkimuksia.

Kolmiulotteisen stereokuvan ja pään paikannuksen vaikutuksista virtuaaliympäristössä tehtävän suorituksen tasoon on raportoitu ristiriitaisia tuloksia aiemminkin. Singerin ja muiden tutkimuksessa [62] koehenkilöiden tehtävänä oli arvioida ihmishahmojen etäisyyksiä, siirtää kursori paikallaan pysyvän tai liikkuvan pallon päälle, suorittaa tietty reitti kymmenen huoneen läpi sekä siirrellä palloja korista toiseen kypäränäytöllä luodussa virtuaalimaailmassa. Tulokset osoittivat, että sekä stereoskopian että pään paikannuksen käyttöönotto paransivat etäisyyksien arviointia etenkin lyhyillä etäisyyksillä. Sen sijaan ei pallon seuraamisen nopeuden ja tarkkuuden, reitin kulkemiseen käytetyn ajan ja seiniin törmäysten eikä pallojen siirtämiseen käytetyn ajan ja tarkkuuden suhteen löydetty mitään eroa immersiotasojen välillä. Barfield ja muut [3] tutkivat suorituksia tehtävässä, jossa piti seurata virtuaalista johtoa virtuaalisella kynällä. Mittareina olivat suorituksen tarkkuus ja tehtävään kuluva aika. Sekä stereokuva että paikannus paransivat tarkkuutta. Pään paikannus kuitenkin hidasti suoritusta stereokuvan kanssa. Tämä saattoi johtua pel-

kästään siitä, että mahdollisuus tarkastella virtuaaliympäristöä eri kulmista päättä liikuttamalla sai koehenkilöt käyttämään enemmän aikaa tehtävään kuin silloin, kun kuvakulma ei ollut henkilöön sidottu.

Kokemus raskaiden työkoneneiden kuljettamisesta osoittautui hyödylliseksi simulaattorilla tehdyissä testisuorituksissa nostettujen ja kuljetettujen kivien määrien osalta. Tämä on ilahduttavaa simulaattorin kehittäjien kannalta. Voidaanhan ajatella, että koska kokeneet kuljettajat suoriutuivat työtehtävästä paremmin, muistuttaa simulaattori siinä mielessä oikeaa konetta. Sen sijaan kokemuksella ajopeleistä ja -simulaattoreista ei ollut vaikutusta suoritustasoa mittaaviin suureisiin, joten simulaattori ei siinä mielessä ole pelin kaltainen. Nimenomaan liikealusta oli ratkaiseva tekijä ryhmien Kuljettajat ja Ei-kuljettajat välillä. Työkoneen liikkeiden rajuus saat- taa tulla yllätyksenä kokemattomalle ajajalle. Juuri kivikasaan ajettaessa kuljettaja saa tuntea koneen heilahtelut penkin välityksellä. Ei siis ole yllätys, että kokeneet kuljettajat onnistuivat liikealustan kanssa paremmin kuin kokemattomat.

Tietenkin monia muita immersiotekijöitä jäi tässä tutkimuksessa tarkastele- mata. Esimerkiksi äänimaailman realismi ja virtuaalisen ohjauspaneelin toiminnal- lisuuden toteuttaminen kosketuspalauteella tai ilman ovat asioita, joiden merkitys- tä kannattaa jatkossa tutkia. Passiivisen haptiikan vaikutusta voitaisiin tarkastella esimerkiksi rakentamalla työkoneen ohjaamon seinistä fyysinen malli, joka toisi kon- kreettiset rajat ajajan liikkeille virtuaaliohjaamossa. Esimerkiksi Meehanin ja mui- den [43] tutkimuksessa havaittiin läsnäolon tunteen merkittävä kasvu passiivisen haptisen elementin lisäämisen, kuvataajuuden kasvattamisen ja latenssin vähentä- misen myötä. Hoffman ja muut [25] huomasivat passiivisen haptiikan lisäävän koet- tua läsnäolon tunnetta sekä parantavan tuloksia kokeissa, joissa testattiin virtuaa- liympäristön käyttöä hämähäkkikammoisten ihmisten hoitamiseen. Tulokset tuntu- vat kuitenkin olevan sovelluskohtaisia. Lokin ja muiden tutkimuksessa [38] verrattiin palikoiden järjestelytehtävän suorittamista virtuaalisilla ja oikeilla palikoilla. Lisäksi koehenkilön käsien virtuaalisen mallin realismia vaihdeltiin. Tulokset osoittivat, että suorituskyky oli paras oikeilla palikoilla eli passiivista haptiikkaa käyttäen. Sen sijaan raportoidussa läsnäolon tunteessa ei havaittu eroa. Käsien virtuaalimallin rea- listisuudella ei ollut merkitystä kummassakaan suhteessa. Olisikin mielenkiintoista tutkia, mikä olisi konkreettisen ja virtuaalisen ohjauspaneelin ero kuormajasimu- laattorissa toisaalta suoritustason ja toisaalta läsnäolon tunteen osalta, vai olisiko sitä ollenkaan. Myös aktiivisen kosketus- ja voimapalautteen saaminen esimerkik- si virtuaalisen ohjauspaneelin painikkeista voisi vaikuttaa läsnäolon tunteeseen ja suoritustasoon. Esimerkiksi Sallnäsin tutkimuksessa [54] havaittiin haptisen palaut- teen sekä lisäävän läsnäolon tunnetta että parantavan suoritustasoa kokeessa, jos- sa koehenkilöt suorittivat virtuaaliympäristössä tehtäviä, joihin liittyi virtuaalisten kappaleiden käsittelyä.

Lopuksi on vielä hyvä huomioida, että tässä käytetty PQ-lomakkeeseen perustuva menetelmä läsnäolon tunteen mittaamiseen on yksi paljon käytetty tapa muttei suinkaan ainoa. On oikeutettua kysyä, miten luotettavasti käyttäjät pystyvät arvioimaan tuntemuksiaan täyttämällä kysymyslomakkeen aina testiajon jälkeen. Esimerkiksi Slater [67] on esittänyt voimakasta kritiikkiä sitä kohtaan, että kyselylomakkeita käytetään läsnäolon tunteen arviointiin. Lomakkeen käyttö on kuitenkin hyvä lähtökohta. Läsnäolon tunteen mittaaminen suoremmin esimerkiksi tutkimalla käyttäjän reaktioita johonkin yllättävään tapahtumaan virtuaaliympäristössä on huomattavasti monimutkaisempaa ja vaatisi psykologisen asiantuntemuksen tuomisen mukaan tutkimusprosessiin. Yksi tapa tulevaisuudessa voisi olla tutkia sitä, huomaako käyttäjä jonkin virtuaalimaailman ulkopuolella olevan taustatekijän muutoksen kuten taustamusiikin tai -valaistuksen vaihtelun. Joka tapauksessa haastattelujen käyttö käyttäjän tuntemuksien tarkempaan analysointiin on tärkeää.



## 6. TUTKIMUKSEEN LIITTYVÄT JULKAISUT

Tähän tutkimukseen liittyviä tuloksia on julkaistu seuraavissa artikkeleissa:

- [I] Jukka Kuusisto, Asko Ellman, Taina Kaapu ja Tarja Tiainen. Effect of the immersion level of a virtual loader simulator on the sense of presence. *Proceedings of the ASME 2011 World Conference on Innovative Virtual Reality*, Milano, Italia, 27.–29.6.2011.
- [II] Jukka Kuusisto, Taina Kaapu, Asko Ellman ja Tarja Tiainen. Developing VIP2M: A Virtual Environment for Prototyping Mobile Work Machines *The International Design Conference — Design 2012*, Dubrovnik, Kroatia, 21.–24.5.2012. *Hyväksytty julkaistavaksi*.
- [III] Tarja Tiainen, Taina Kaapu, Asko Ellman ja Jukka Kuusisto. A Co-Creation Tool in Walk-in Virtual Environment: Making Prospective Work Visible. *The European Conference on Information Systems (ECIS)*, 10.–13.6.2012, Barcelona, Espanja. *Hyväksytty julkaistavaksi*.

Julkaisussa [I] (liite C) esitetään tulokset käyttäjäkokeista, joissa tutkittiin koehenkilöiden kokemaa läsnäolon tunnetta kaivoskonesimulaattorilla tehdyissä testisuorituksissa. Tulokset osoittavat, että liikealustan aktivoiminen lisää läsnäolon tunnetta, mutta kaksiulotteisesta näkymästä kolmiulotteiseen siirtyminen ei sitä tee merkittävässä määrin. Lisäksi osoitetaan, että kokeneet työkoneiden kuljettajat tuntevat vähemmän läsnäoloa kuin kokemattomat.

Julkaisussa [II] (liite D) kuvataan työkonesimulaattorin kehittämisen prosessi kaksivaiheisena toimintatutkimusprojektina. Simulaattorin ensimmäisessä prototyypissä on kolmen seinän panoraamanäyttö, pneumaattinen liikealusta ja alkeellinen äänimaailma. Kaivoskonealan ammattilaisten kanssa tehtyjen käyttäjäkokeiden tuloksena saadaan tietoa siitä, miten simulaattoria kannattaa kehittää. Simulaattorin toiseen prototyyppiin toteutetaan liikealustaan jäykemmät toimilaitteet, parannetaan virtuaalimaisen valaistusolosuhteita, otetaan käyttöön suuremmat näyttöpinnat ja asetetaan ne kohtisuoraan immersion lisäämiseksi sekä tehdään äänimaailmasta realistisempi. Simulaattorin toista prototyyppiä käytetään tähän tutkimukseen liittyvissä käyttäjäkokeissa.

Julkaisussa [III] (liite E) kuvataan kehitetty simulaattori työkaluna, jolla koneen käyttäjät voivat osallistua tuotekehitykseen eli koneen prototypointiin ja rakentamiseen virtuaaliympäristössä. Artikkelissa osoitetaan, että virtuaaliympäristö on hyödyllinen perusta sellaisten työkalujen rakentamiseen, joilla tuotteen käyttäjät voivat osallistua suunnitteluun. Käyttäjäkokeiden tulokset osoittavat liikealustan merkityksen simulaattorissa: kokeneiden kuljettajien tulokset kivien siirrossa olivat selvästi paremmat, kun liikealusta oli aktivoitu.

## 7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Läsnäolon tunnetta virtuaaliympäristöissä mitataan yleisimmin käyttäjän itsearviointiin perustuvilla kyselylomakkeella. Jotta subjektiivisista arvioista päästäisiin siirtymään objektiivisiin mittareihin, täytyisi määritellä, mitä tarkkaan ottaen läsnäolon tunteella tarkoitetaan ja minkälaiset ihmisen reaktiot ovat merkkejä korkeasta läsnäolon tunteesta. Määritelmän mukaisestihan todellisessa maailmassa koetun läsnäolon tunteen pitäisi normaalioloissa olla huipussaan. Tähän ongelmaan ei virtuaaliympäristöjä koskevista tutkimuksista vielä löydy kattavaa ratkaisua.

Käyttäjäkokeet osoittivat, että virtuaaliympäristöön rakennetussa kaivoskonesimulaattorissa liikealustan aktivoiminen lisää käyttäjille syntyvää läsnäolon tunnetta, kun sitä mitataan itsearviointilomakkeella. Kuitenkaan immersio-komponenttien lisääminen ei automaattisesti aina voimista läsnäoloa: kaksiulotteisen näkymän vaihtamisella kolmiulotteiseen sekä pään paikannuksen käyttöön otolla ei ollut samanlaista vaikutusta käyttäjäkokeissa. Käyttäjän taustalla oli merkitystä, koska kokeneet työkonekuljettajat raportoivat vähäisempää läsnäolon tunnetta kuin muut koehenkilöt. Koska nimenomaan liikealustan käyttö sai kokeneet kuljettajat onnistumaan testisuorituksissa kokemattomia paremmin, liikealustan merkitys simulaattorin realistisuudelle on ratkaisevan tärkeä.

Työkonesimulaattorin kehitystyössä on tärkeää, että prosessiin osallistuu henkilöitä, joilla on kokemusta oikeista koneista. Käytettäessä simulaattoria tuotekehitys- ja koulutustarkoituksiin läsnäolon tunne on lähtökohtaisesti tavoiteltava asia. Ammattilaiskäyttöön tarkoitetun simulaattorin kehittämisessä kokeneilta kuljettajilta saatu palaute voi auttaa löytämään oleelliset simulaattorin yksityiskohdat, joita olisi kehitettävä läsnäolon tunteen syntymiseksi.

Jotta simulaattoria voitaisiin käyttää kollaboratiivisen suunnittelun työkaluna, jolla käyttäjät ja suunnittelijat tekevät yhteistyötä, on 3D CAD -mallin ja virtuaaliympäristöön visualisoidun mallin välinen vuorovaikutus saatava joustavaksi. Nykytilanteessa CAD-mallin konvertointi visualisointia varten vie aikaa tunneista päiviin riippuen mallin koosta ja yksityiskohtaisuudesta. Virtuaalimallin muokkaaminen suoraan onnistuu jo tietyissä rajoissa, mutta muutosten vieminen CAD-malliin jää tulevaisuudessa ratkaistavaksi ongelmaksi. Toinen asia kollaboratiivisen suunnittelun kannalta olisi virtuaalimallin jakaminen eri paikoissa sijaitsevien virtuaaliympäristöjen kanssa. Tällöin toimijat eri puolilla maailmaa voisivat kommentoida ja

arvioida samaa mallia samanaikaisesti. Tätä tarkoitusta varten simulaattoriin olisi toteutettava reaaliaikainen yhteys ja mallin jakaminen internetin yli.

## LÄHTEET

- [1] Ivan Alsina-Jurnet ja José Gutiérrez-Maldonado. Influence of personality and individual abilities on the sense of presence experienced in anxiety triggering virtual environments. *International Journal of Human-Computer Studies*, 68(10):788–801, 2010.
- [2] Pat Banerjee, Grace M. Bochenek, ja James M. Ragusa. Analyzing the relationship of presence and immersive tendencies on the conceptual design review process. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2:59–64, maaliskuu 2002.
- [3] Woodrow Barfield, Claudia Hendrix, ja Karl-Erik Bystrom. Effects of stereopsis and head tracking on performance using desktop virtual environment displays. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 8(2):237–240, 1999.
- [4] Patrick J. Barron, Philip M.O. Owende, Kevin P. McDonnell, ja Shane M. Ward. A method for assessment of degradation of task visibility from operator cabins of field machines. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35(7):665–673, 2005.
- [5] R. M. Baños, C. Botella, A. Garcia-Palacios, H. Villa, C. Perpiña, ja M. Alcañiz. Presence and reality judgment in virtual environments: A unitary construct? *CyberPsychology & Behavior*, 3(3):327–335, 2000.
- [6] Roland Blach. Virtual reality technology - an overview. Kirjassa Doru Talaba ja Angelos Amditis, toim., *Product Engineering — Tools and Methods Based on Virtual Reality*, s. 21–64. Springer Netherlands, 2008.
- [7] Stéphane Bouchard, Julie St-Jacques, Geneviève Robillard, ja Patrice Renaud. Anxiety increases the feeling of presence in virtual reality. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 17(4):376–391, elokuu 2008.
- [8] Fabio Bruno, Francesco Caruso, Kezhun Li, Alessandro Milite, ja Maurizio Muzzupappa. Dynamic simulation of virtual prototypes in immersive environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 43:620–630, 2009.
- [9] Marc Cavazza, Jean-Luc Lugin, ja Marc Buehner. Causal perception in virtual reality and its implications for presence factors. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 16(6):623–642, joulukuu 2007.

- [10] Chin-Bong Choi, Peom Park, Young-Ho Kim, M. Susan Hallbeck, ja Myung-Chul Jung. Comparison of visibility measurement techniques for forklift truck design factors. *Applied Ergonomics*, 40(2):280–285, 2009.
- [11] C. Coelho, J.G. Tichon, T.J. Hine, G.M. Wallis, ja G. Riva. Media presence and inner presence: The sense of presence in virtual reality technologies. Kirjassa G. Riva, M.T. Anguera, B.K. Wiederhold, ja F. Mantovani, toim., *From Communication to Presence: Cognition, Emotions and Culture towards the Ultimate Communicative Experience*, s. 25–45. IOS Press, Amsterdam, 2006.
- [12] Mihaly Csikszentmihalyi. *Beyond boredom and anxiety: Experiencing flow in work and play*. Jossey-Bass, San Fransisco, 1975.
- [13] John V. Draper, David B. Kaber, ja John M. Usher. Speculations on the value of telepresence. *CyberPsychology & Behavior*, 2(4):349–362, 1999.
- [14] Mark H. Draper. *The Adaptive Effects Of Virtual Interfaces: Vestibulo-Ocular Reflex and Simulator Sickness*. Väitöskirja, University of Washington, 1998.
- [15] Stephen R. Ellis. Presence of mind: A reaction to thomas sheridans 'further musings on the psychophysics of presence'. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 5(2):247–259, 1996.
- [16] Roger Fales, Erik Spencer, Kurt Chipperfield, Frank Wagner, ja Atul Kelkar. Modeling and control of a wheel loader with a human-in-the-loop assessment using virtual reality. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 127:415–423, syyskuu 2005.
- [17] Jonathan Freeman, S. E. Avons, Ray Meddis, Don E. Pearson, ja Wijnand IJsselsteijn. Using behavioural realism to estimate presence: A study of the utility of postural responses to motion stimuli. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 9(2):149–164, huhtikuu 2000.
- [18] Jawaid A. Ghani ja Satish P. Deshpande. Task characteristics and the experience of optimal flow in human-computer interaction. *Journal of Psychology*, 128(4):381–391, 1994.
- [19] Alison Godwin ja Tammy Eger. Using virtual computer analysis to evaluate the potential use of a camera intervention on industrial machines with line-of-sight impairments. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39(1):146–151, 2009.

- [20] Alison A. Godwin, Tammy R. Eger, Alan W. Salmoni, ja Paul G. Dunn. Virtual design modifications yield line-of-sight improvements for lhd operators. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 38(2):202–210, 2008.
- [21] Mario Arturo Gutiérrez, Frédéric Vexo, ja Daniel Thalmann. *Stepping into virtual reality*, chapter Other VR Applications, s. 181–188. Springer, 2008.
- [22] Chris Hand. From dreams to reality. Kirjassa *Proceedings of the 1<sup>st</sup> UK VR-SIG Conference*. Nottingham University, UK, maaliskuu 1994.
- [23] Jimmie W. Hinze ja Jochen Teizer. Visibility-related fatalities related to construction equipment. *Safety Science*, 49(5):709–718, 2011.
- [24] L.F. Hodges, R. Kooper, T.C. Meyer, B.O. Rothbaum, D. Opdyke, J.J. de Graaff, J.S. Williford, ja M.M. North. Virtual environments for treating the fear of heights. *Computer*, 28(7):27–34, heinäkuu 1995.
- [25] Hunter G. Hoffman, Azucena Garcia-Palacios, Albert Carlin, Thomas A. Furness III, ja Cristina Botella-Arbona. Interfaces that heal: Coupling real and virtual objects to treat spider phobia. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 16(2):283–300, 2003.
- [26] Jiung-Yao Huang ja Chung-Yun Gau. Modelling and designing a low-cost high-fidelity mobile crane simulator. *International Journal of Human-Computer Studies*, 58:151–176, 2003.
- [27] Roger Hudson. Reflections on site usability and the state of flow. <URL:<http://www.usability.com.au/resources/flow.cfm>>, viitattu 24.3.2012, 1998.
- [28] Wijnand IJsselsteijn, Don Bouwhuis Huib de Ridder, Roelof Hamberg, ja Jonathan Freeman. Perceived depth and the feeling of presence in 3DTV. *Displays*, 18:207–214, 1998.
- [29] Wijnand A. IJsselsteijn, Huib de Ridder, Jonathan Freeman, ja S.E. Avons. Presence: Concept, determinants and measurement. Kirjassa *Proceedings of the SPIE*, osa 3959, s. 520–529, 2000.
- [30] Eui S. Jung, Yongtak Shin, ja Dohyung Kee. Generation of visual fields for ergonomic design and evaluation. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 26(4):445–456, 2000.
- [31] R. S. Kalawsky, S. T. Bee, ja S. P. Nee. Human factors evaluation techniques to aid understanding of virtual interfaces. *BT Technology Journal*, 17(1):128–141, tammikuu 1999.

- [32] Omar Khan, Paul Huang, ja Steve Untz. Display technology application assessment for virtual systems. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 1:243–251, 2007. 10.1007/s12008-007-0023-3.
- [33] L. F. M. Kuijt-Evers, F. Krause, ja P. Vink. Aspects to improve cabin comfort of wheel loaders and excavators according to operators. *Applied Ergonomics*, 34(3):265–271, 2003.
- [34] Seong-Jin Kwon, Jee-Hoon Chun, Jong-Hyun Bae, ja Myung-Won Suh. A Study on the factors that improve the velocity perception of a virtual reality-based vehicle simulator. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 21(1):39–54, 2006.
- [35] Kwan Min Lee. Presence, explicated. *Communication Theory*, 14(1):27–50, 2004.
- [36] Kwan Min Lee. Why presence occurs: Evolutionary psychology, media equation, and presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 13:494–505, elokuu 2004.
- [37] Wang Lijing, Xiang Wei, He Xueli, Sun Xiaohui, Yu Jinhai, Zhou Lin, ja Sun Gaoyong. The virtual evaluation of the ergonomics layout in aircraft cockpit. Kirjassa *Proceedings of the IEEE 10th International Conference on Computer-Aided Industrial Design Conceptual Design*, s. 1438–1442, marraskuu 2009.
- [38] Benjamin Lok, Samir Naik, Mary Whitton, ja Frederick P. Brooks, Jr. Effects of handling real objects and self-avatar fidelity on cognitive task performance and sense of presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 12:615–628, joulukuu 2003.
- [39] Matthew Lombard ja Theresa Ditton. At the Heart of It All: The Concept of Presence. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 3(2), syyskuu 1997.
- [40] J.M. Loomis. Understanding synthetic experience must begin with the analysis of ordinary perceptual experience. Kirjassa *Virtual Reality, 1993. Proceedings., IEEE 1993 Symposium on Research Frontiers in*, s. 54–57, lokakuu 1993.
- [41] Fausto Massimini ja Carli Massimo. The Systematic Assessment of Flow in Daily Experience. Kirjassa M. Csikszentmihalyi ja I. Csikszentmihalyi, toim., *Optimal Experience*, s. 288–306. Cambridge University Press, New York, 1988.
- [42] Markku Mattila. Computer-aided ergonomics and safety — a challenge for integrated ergonomics. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 17(4):309–314, 1996.



- [43] Michael Meehan, Sharif Razzaque, Brent Insko, Mary Whitton, ja Frederick Brooks. Review of four studies on the use of physiological reaction as a Measure of presence in stressful virtual environments. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 30:239–258, 2005. 10.1007/s10484-005-6381-3.
- [44] Marvin Minsky. Telepresence. *Omni*, 2:45–52, 1980.
- [45] Fiona Fui-Hoon Nah, Brenda Eschenbrenner, ja David DeWester. Enhancing brand equity through flow and telepresence: A comparison of 2D and 3D virtual worlds. *MIS Quarterly*, 35(3):731–747, 2011.
- [46] Sarah Nichols, Clovissa Haldane, ja John R. Wilson. Measurement of presence and its consequences in virtual environments. *International Journal of Human-Computer Studies*, 52:471–491, maaliskuu 2000.
- [47] Thomas P. Novak, Donna L. Hoffman, ja Yiu-Fai Yung. Measuring the customer experience in online environments: A structural modeling approach. *Marketing Science*, 19:22–42, tammikuu 2000.
- [48] Patrick Péruch ja Daniel Mestre. Between desktop and head Immersion: Functional visual field during vehicle control and navigation in virtual Environments. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 8:54–64, helmikuu 1999.
- [49] Patrice Renaud, Sylvain Chartier, Guillaume Albert, Jean Décarie, Louis-Georges Cournoyer, ja Stéphane Bouchard. Presence as determined by fractal perceptual-motor dynamics. *Cyberpsychology and Behavior*, 10(1):122–130, 2007.
- [50] Xavier Rétaux. Presence in the environment: theories, methodologies and applications to video games. *PsychNology Journal*, 1(3):283–309, 2003.
- [51] Giuseppe Riva ja John A. Waterworth. Presence and the self: a cognitive neuroscience approach. *Presence-Connect*, 3(3), Available online: <<http://www8.informatik.umu.se/~jwworth/Riva-Waterworth.htm>>, huhtikuu 2003.
- [52] Giuseppe Riva, John A. Waterworth, ja Eva L. Waterworth. The layers of presence: a bio-cultural approach to understanding presence in natural and mediated environments. *Cyberpsychology & Behaviour*, 7(4):405–419, 2004.
- [53] P. Salamin, D. Thalmann, ja F. Vexo. Comfortable manipulation of a virtual gearshift prototype with haptic feedback. Kirjassa *Proceedings of EuroHaptics '06*, s. 125–130, 2006.

- [54] Eva-Lotta Sallnäs. Presence in multimodal interfaces. Kirjassa *Proceedings of the Second International Workshop on Presence*, Colchester, Iso-Britannia, 6.–7. huhtikuuta 1999. University of Essex.
- [55] David W. Schloerb. A quantitative measure of telepresence. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 4(1):64–80, 1995.
- [56] Thomas Schubert, Frank Friedmann, ja Holger Regenbrecht. Embodied Presence in virtual environments. Kirjassa Ray Paton & Irene Neilson, toim., *Visual Representations and Interpretations*, s. 269–278. Springer-Verlag, 1999.
- [57] Thomas Schubert, Frank Friedmann, ja Holger Regenbrecht. The Experience of presence: Factor analytic insights. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 10:266–281, kesäkuu 2001.
- [58] Álvaro Segura, Aitor Moreno, Gino Brunetti, ja Thomas Henn. *Ergonomics and Health Aspects of Work with Computers*, sarjan *Lecture Notes in Computer Science* osa 4566, chapter Interaction and Ergonomics Issues in the Development of a Mixed Reality Construction Machinery Simulator for Safety Training, s. 290–299. Springer Berlin / Heidelberg, 2007.
- [59] Rabindra Nath Sen ja Subir Das. An ergonomics study on compatibility of controls of overhead cranes in a heavy engineering factory in west bengal. *Applied Ergonomics*, 31(2):179–84, 2000.
- [60] Thomas B. Sheridan. Musings on telepresence and virtual presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1:120–126, tammikuu 1992.
- [61] Wooyoung Shim ja Gerard Jounghyun Kim. Designing for presence and performance: the case of the virtual fish tank. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 12:374–386, elokuu 2003.
- [62] Michael J. Singer, Jennifer Ehrlich, Stephen Cinq-Mars, ja Jean-Paul Papin. Task performance in virtual environments: stereoscopic versus monoscopic displays and head-coupling. Tekninen raportti 1034, United States Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences, joulukuu 1995.
- [63] Michael J. Singer ja Bob G. Witmer. On selecting the right yardstick. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 8:566–573, lokakuu 1999.
- [64] M. Slater ja M. Usoh. Presence in immersive virtual environments. Kirjassa *Virtual Reality Annual International Symposium, 1993., 1993 IEEE*, s. 90–96, syyskuu 1993.

- [65] Mel Slater. Measuring presence: A response to the witmer and singer presence questionnaire. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 8:560–565, lokakuu 1999.
- [66] Mel Slater. A note on presence technology. Presence-Connect, Jan. 2003; <<http://presence.cs.ucl.ac.uk/presenceconnect/articles/Jan2003/melslaterJan27200391557/melslaterJan27200391557.html>>, viitattu osoitteesta <<http://publicationslist.org/melslater>> 11.4.2012, 2003.
- [67] Mel Slater. How colorful was your day? why questionnaires cannot Assess Presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 13:484–493, elokuu 2004.
- [68] Mel Slater ja Anthony Steed. A virtual presence counter. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 9:413–434, lokakuu 2000.
- [69] Mel Slater, Martin Usuh, ja Anthony Steed. Depth of presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 3:130–144, 1994.
- [70] Anna Spagnolli ja Luciano Gamberini. A place for presence. understanding the human involvement in mediated interactive environments. *PsychNology Journal*, 3(1):6–15, 2005.
- [71] Kay M. Stanney ja Gavriel Salvendy. Aftereffects and sense of presence in virtual environments: Formulation of a research and development agenda. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 10(2):135–187, 1998.
- [72] Jonathan Steuer. Defining virtual reality: Dimensions determining telepresence. *Journal of Communication*, 42:73–93, 1992.
- [73] D. Stewart. A platform with six degrees of freedom. *Proc. Institution of Mechanical Engineers*, 180(15), 1966.
- [74] Jari Takatalo, Göte Nyman, ja Leif Laaksonen. Components of human experience in virtual environments. *Computers in Human Behavior*, 24:1–15, 2008.
- [75] Martin Usuh, Christina Alberto, ja Mel Slater. Presence: Experiments in the psychology of virtual environments. Saatavilla verkosta: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.35.6637>>, viitattu 12.4.2012, 1996.

- [76] Martin Usoh, Ernest Catena, Sima Arman, ja Mel Slater. Using presence Questionnaires in reality. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 9:497–503, lokakuu 2000.
- [77] Vinoba Vinayagamoorthy, Andrea Brogni, Marco Gillies, Mel Slater, ja Anthony Steed. An investigation of presence response across variations in visual realism. Kirjassa *The 7th Annual International Presence Workshop*, 2004.
- [78] Jeenal Vora, Santosh Nair, Anand K. Gramopadhye, Andrew T. Duchowski, Brian J. Melloy, ja Barbara Kanki. Using virtual reality technology for aircraft visual inspection training: presence and comparison studies. *Applied Ergonomics*, 33(6):559–570, 2002.
- [79] J. A. Waterworth ja E. L. Waterworth. Being and time: judged presence and duration as a function of media form. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 12:495–511, lokakuu 2003.
- [80] B. K. Wiederhold, R. Davis, ja M. D. Wiederhold. The effects of immersiveness on physiology. *Studies In Health Technology And Informatics*, 58(1):52–60, 1998.
- [81] Bob G. Witmer, Jero Christian J., ja Michael J. Singer. The factor structure of the presence questionnaire. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 14:298–312, kesäkuu 2005.
- [82] Bob G. Witmer ja Michael J. Singer. Measuring presence in virtual Environments: A presence questionnaire. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7:225–240, kesäkuu 1998.
- [83] Hassan Yousefi, Amir Mohssen Soleimani, ja Heikki Handroos. *Human Centered Design*, sarjan *Lecture Notes in Computer Science* osa 5619, chapter Human Centered Design of Mobile Machines by a Virtual Environment, s. 1099–1108. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- [84] David Zeltzer. Autonomy, interaction, and presence. *Presence*, 1(1):127–132, 1992.
- [85] Chris L. Zimmermann, Thomas M. Cook, ja John C. Rosecrance. Work-related musculoskeletal symptoms and injuries among operating engineers: A review and guidelines for improvement. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 12(7):480–484, 1997.

## A. IMMERSIVE TENDENCIES

### QUESTIONNAIRE

1. Do you ever get extremely involved in projects that are assigned to you by your boss or your instructor, to the exclusion of other tasks?
2. How easily can you switch your attention from the task in which you are currently involved to a new task?
3. How frequently do you get emotionally involved (angry, sad, or happy) in the news stories that you read or hear?
4. How well do you feel today?
5. Do you easily become deeply involved in movies or TV dramas?
6. Do you ever become so involved in a television program or book that people have problems getting your attention?
7. How mentally alert do you feel at the present time?
8. Do you ever become so involved in a movie that you are not aware of things happening around you?
9. How frequently do you find yourself closely identifying with the characters in a story line?
10. Do you ever become so involved in a video game that it is as if you are inside the game rather than moving a joystick and watching the screen?
11. On average, how many books do you read for enjoyment in a month?
12. How physically fit do you feel today?
13. How good are you at blocking out external distractions when you are involved in something?
14. When watching sports, do you ever become so involved in the game that you react as if you were one of the players?
15. Do you ever become so involved in a daydream that you are not aware of things happening around you?
16. Do you ever have dreams that are so real that you feel disoriented when you awake?
17. When playing sports, do you become so involved in the game that you lose track of time?
18. Are you easily disturbed when working on a task?
19. How well do you concentrate on enjoyable activities?

20. How often do you play arcade or video games?
21. How well do you concentrate on disagreeable tasks?
22. Have you ever gotten excited during a chase or fight scene on TV or in the movies?
23. To what extent have you dwelled on personal problems in the last 48 hours?
24. Have you ever gotten scared by something happening on a TV show or in a movie?
25. Have you ever remained apprehensive or fearful long after watching a scary movie?
26. Do you ever avoid carnival or fairground rides because they are too scary?
27. How frequently do you watch TV soap operas or docu-dramas?
28. Do you ever become so involved in doing something that you lose all track of time?

## B. PRESENCE QUESTIONNAIRE

1. How much were you able to control events?
2. How responsive was the environment to actions that you initiated (or performed)?
3. How natural did the interactions with the environment seem?
4. How completely were *all* of your senses engaged?
5. How much did the visual aspects of the environment involve you?
6. How much did the auditory aspects of the environment involve you?
7. How natural was the mechanism which controlled movement through the environment?
8. How aware were you of events occurring in the real world around you?
9. How aware were you of your display and control devices?
10. How compelling was your sense of objects moving through space?
11. How inconsistent or disconnected was the information coming from your various senses?
12. How much did your experiences in the virtual environment seem consistent with your real-world experiences?
13. Were you able to anticipate what would happen next in response to the actions that you performed?
14. How completely were you able to actively survey or search the environment using vision?
15. How well could you identify sounds?
16. How well could you localize sounds?
17. How well could you actively survey or search the virtual environment using touch?
18. How compelling was your sense of moving around inside the virtual environment?
19. How closely were you able to examine objects?
20. How well could you examine objects from multiple viewpoints?
21. How well could you move or manipulate objects in the virtual environment?
22. To what degree did you feel confused or disoriented at the beginning of breaks or at the end of the experimental session?
23. How involved were you in the virtual environment experience?

24. How distracting was the control mechanism?
25. How much delay did you experience between your actions and expected outcomes?
26. How quickly did you adjust to the virtual environment experience?
27. How proficient in moving and interacting with the virtual environment did you feel at the end of the experiment?
28. How much did the visual display quality interfere or distract you from performing assigned tasks or required activities?
29. How much did the control devices interfere with the performance of assigned tasks or with other activities?
30. How well could you concentrate on the assigned tasks or required activities rather than on the mechanisms used to perform those tasks or activities?
31. Did you learn new techniques that enables you to improve your performance?
32. Were you involved in the experimental task to the extent that you lost track of time?



## C. JULKAISU I: EFFECT OF THE IMMERSION LEVEL OF A VIRTUAL LOADER SIMULATOR ON THE SENSE OF PRESENCE

Jukka Kuusisto, Asko Ellman, Taina Kaapu ja Tarja Tiainen. Effect of the immersion level of a virtual loader simulator on the sense of presence. *Proceedings of the ASME 2011 World Conference on Innovative Virtual Reality*, Milano, Italia, 27.–29.6.2011.

## D. JULKAISU II: DEVELOPING VIP2M: A VIRTUAL ENVIRONMENT FOR PROTOTYPING MOBILE WORK MACHINES

Jukka Kuusisto, Taina Kaapu, Asko Ellman ja Tarja Tiainen. Developing VIP2M: a virtual environment for prototyping mobile work machines *The International Design Conference — Design 2012*, Dubrovnik, Kroatia, 21.–24.5.2012. *Hyväksytty julkais-  
tavaksi.*

## E. JULKAISU III: A CO-CREATION TOOL IN WALK-IN VIRTUAL ENVIRONMENT: MAKING PROSPECTIVE WORK VISIBLE

Tarja Tiainen, Taina Kaapu, Asko Ellman ja Jukka Kuusisto. A co-creation tool in walk-in virtual environment: making prospective work visible. *The European Conference on Information Systems (ECIS)*, 10.–13.6.2012, Barcelona, Espanja. *Hyväksytty julkaistavaksi.*